



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



MODIFIKACE OSTŘÍ BRUSLÍ POMOCÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Bc. Petr Hynek**
Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

MODIFICATION OF ICE SKATE BLADES BY SURFACE TREATMENT

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2303T002 – Engineering Technology
Author: **Bc. Petr Hynek**
Supervisor: prof. Ing. Petr Louda, CSc.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Hynek**
Osobní číslo: **S12000443**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie**
Název tématu: **Modifikace ostří bruslí pomocí povrchových úprav**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte rešerši v oblasti povrchových úprav a použitých materiálů.
2. Navrhněte a vytvořte vhodné typy vrstev pro danou aplikaci.
3. Provedte hodnocení vybraných vlastností (adheze, nanotvrdost, tribologie, hodnocení morfologie povrchu) dvojice tenká vrstva substrát.
4. Analyzujte provedené experimenty a vyvoďte příslušné závěry.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 40 - 50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] CALLISTER, William D. *Materials science and engineering: an introduction*. 7th ed. New York: John Wiley, c2007, xxv, 721, A41, G14, S5, I22 p. ISBN 978-047-1736-967.
- [2] BOXMAN, R, David M SANDERS a Philip J MARTIN. *Handbook of vacuum arc science and technology: fundamentals and applications*. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications, c1995, xxxi, 742 p. ISBN 08-155-1375-5.
- [3] MARTIN, Peter. ed *Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology*. 3rd ed. Norwich, N.Y: William Andrew, 2009. ISBN 978-081-5520-313.
- [4] PRELAS, Mark Antonio. *Diamond based composites: and related materials*. Boston: Kluwer Academic Publishers, c1997, xii, 386 p. ISBN 07-923-4667-X.
- [5] BLICHARSKI, Marek. *Inżynieria materiałowa: stal*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004. ISBN 83-204-2995-1.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.
Katedra materiálu
Konzultant diplomové práce: Ing. Totka Bakalová, Ph.D.
Ostatní konzultanti: Ing. Lukáš Voleský

Datum zadání diplomové práce: 14. listopadu 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 15. května 2015

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



prof. Ing. Petr Louda, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 14. listopadu 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 27. května 2016

Podpis:



Poděkování

Prostřednictvím následujících řádků bych rád vyjádřil vděčnost všem, kteří mi pomáhali nejen při tvorbě této práce.

Především děkuji panu prof. Ing. Petru Loudovi, CSc. za vedení diplomové práce, za cenné podněty a za trpělivost projevenou i v době, kdy mi psaní diplomové práce šlo s obtížemi. Děkuji také paní Ing. Totce Bakalové, Ph.D. a panu Ing. Lukáši Voleskému za poskytnuté konzultace. Děkuji i paní Ing. Daniele Odehnalové a personálu studijního oddělení FS TUL za pomoc při řešení záležitostí administrativního charakteru. Rovněž děkuji panu Alexandru Filippovovi za zapůjčení vzorků, panu Mojmíru Jílkovi z firmy SHM za konzultace a provedení povlakování, panu Ing. Pavlu Kubínovi z TRW Jablonec za zapůjčení siloměru, panu Ing. Miloši Váňovi ze SZÚ Jablonec za zapůjčení závaží, ledařům Milanovi a Martinovi z jabloneckého zimního stadionu a panu Kročákovi ze Sparty Praha za ochotu při zajišťování ledových ploch.

Největší díky si však zaslouží moji nejbližší. Za možnost studovat vděčím svým rodičům, kteří mi po celý život poskytovali mimořádnou podporu, za což jim od srdce děkuji. Mimořádné poděkování bych rád věnoval své drahé kamarádce Janě Havlíkové – díky za asistenci při experimentech, ale hlavně za oporu a motivaci i v těžkých chvílích, bez které bych se neobešel. Děkuji i zbytku rodiny a přátelům, kteří mi věřili a se kterými jsem mohl sdílet radosti i strasti studentského života.

Anotace

Teoretická část práce nastiňuje problematiku smykového tření mezi ledem a noži ledních bruslí. Dále jsou popsány metody depozice tenkých vrstev z plynné fáze (PVD a CVD) a možnosti jejich zkoušení. Praktická část práce obsahuje postup a výsledky experimentu, jehož cílem bylo posoudit vliv povlaku WCC (tj. povlak DLC s obsahem atomů wolframu) na hodnotu koeficientu smykového tření mezi ledem a ostrým bruslí.

Klíčová slova

povlakování, tenká vrstva, WCC, DLC, PVD, CVD, led, brusle, tření

Annotation

The theoretical part of the thesis outlines the topic of sliding friction between ice and ice skate blades. Further, the methods of deposition of thin films from a gas phase (the PVD and CVD) and the options of their testing are described. The practical part of the thesis consists of a description and results of the experiment, which goal was to evaluate the effect of a WCC coating (i.e. a DLC coating containing tungsten atoms) on the coefficient of sliding friction between ice and ice skate blade.

Key words

coating, thin film, WCC, DLC, PVD, CVD, ice, skates, friction

Obsah

1. Úvod	12
2. Základní vlastnosti ledu a ledních bruslí.....	13
2.1. Vlastnosti ledu.....	13
2.2. Konstrukce ledních bruslí.....	16
2.3. Opatření břitů ledních bruslí.....	19
3. Metody depozice tenkých vrstev	20
3.1. Příprava substrátu.....	21
3.2. Chemická metoda depozice – CVD	22
3.3. Chemická metoda depozice za použití plazmy – PACVD	23
3.4. Fyzikální metoda depozice – PVD.....	25
3.4.1. PVD napařování	27
3.4.2. PVD naprašování	28
3.4.3. PVD magnetronové naprašování.....	29
3.5. Uhlíkové vrstvy podobné diamantu – DLC.....	30
4. Metody hodnocení systémů tenká vrstva – substrát	34
4.1. Zobrazovací metody strukturní analýzy	34
4.2. Měření tloušťky tenkých vrstev	35
4.3. Analýza chemického složení.....	37
4.4. Měření tvrdosti	40
4.5. Měření adhezivního chování.....	41
4.6. Zkoušení tribologických vlastností	43
4.7. Zkoušení tepelné a chemické odolnosti	44
5. Experimentální část práce	46
5.1. Určení koeficientu smykového tření	46
5.1.1. Použité vzorky	46
5.1.2. Metodika měření.....	50
5.1.3. Výsledky měření	56
5.2. Diskuse výsledků.....	59
6. Závěr	61
Citovaná literatura.....	62

Příloha 1	66
Příloha 2	67
Příloha 3	68

Seznam obrázků

Obr. 1: Lední brusle z období středověku vyrobené z kostí	12
Obr. 2: Hexagonální uspořádání ledu I_h	13
Obr. 3: Fázový diagram vody	14
Obr. 4: Schéma kontaktu brusle a ledu	15
Obr. 5: Konvenční hokejová brusle	16
Obr. 6: Nůž povlakovaný DLC	17
Obr. 7: Geometrie břitu brusle	18
Obr. 8: Systém tenká vrstva-substrát	20
Obr. 9: Vlastnosti vrstev dle použité technologie depozice	21
Obr. 10: Iontový bombard	22
Obr. 11: Princip CVD	22
Obr. 12: Schéma RF PACVD	24
Obr. 13: Barvy povlaků $Ti(C,N)$	25
Obr. 14: Princip PVD	26
Obr. 15: Schéma napařování	27
Obr. 16: Schéma naprašování	28
Obr. 17: Schéma iontového reaktivního plátování	29
Obr. 18: Princip planárního magnetronu	30
Obr. 19: Hybridizační stavy uhlíku	31
Obr. 20: Ternární fázový diagram a-C:H	32
Obr. 21: Měření tloušťky vrstvy pomocí šikmého řezu	36
Obr. 22: Schéma kalotestu a princip vyhodnocení	36
Obr. 23: Schéma mechanického profilometru	37

Obr. 24: Úrovně rozlišení některých spektroskopických metod	38
Obr. 25: Schéma měření nanotvrdosti a indentační křivka	41
Obr. 26: Schéma scratch testu	42
Obr. 27: Hodnocení Mercedes testu	42
Obr. 28: Metoda Ball-on-Disc	43
Obr. 29: Schéma fretting testu	44
Obr. 30: Oxidační teploty některých vrstev	45
Obr. 31: Vzorky nožů bez povlaku	46
Obr. 32: Kluzná plocha nože před vyleštěním, 100x zvětšení	47
Obr. 33: Kluzná plocha nože po vyleštění, 100x zvětšení	48
Obr. 34: Kalotest naneseného povlaku WCC.....	49
Obr. 35: Mercedes test naneseného povlaku WCC	49
Obr. 36: Vzorky nožů s povlakem WCC	50
Obr. 37: Přípravek s upevněnými noži a zatížením 40 kg	51
Obr. 38: Nastavení rovnoběžnosti nožů pomocí sklonoměru	52
Obr. 39: Měření tažné síly	53
Obr. 40: Ovládací panel na zimním stadionu v Jablonci nad Nisou.....	54

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti různých DLC vrstev	33
Tabulka 2: Tvrdosti běžných tenkých vrstev	40
Tabulka 3: Koeficienty tření některých povlaků	43
Tabulka 4: Tíhové síly ovlivňující měření	52
Tabulka 5: Průměrné, minimální a maximální naměřené hodnoty součinitele smykového tření	58
Tabulka 6: Vliv povlaku WCC na střední hodnotu koeficientu smykového tření	59
Tabulka 7: Vliv povlaku WCC na celkovou průměrnou hodnotu koeficientu smykového tření	59

Tabulka 8: Výsledky 1. měření - nožů bez povlaku v Jablonci nad Nisou	66
Tabulka 9: Výsledky 2. měření - nožů s povlakem v Jablonci nad Nisou	67
Tabulka 10: Výsledky 3. měření - nožů s povlakem v Praze	68

Seznam grafů

Graf 1: Hodnoty naměřeného součinitele smykového tření	57
Graf 2: Srovnání průměrných hodnot naměřeného součinitele smykového tření ..	58

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglicky	Česky
CVD	Chemical Vapour Deposition	Chemická depozice z plynné fáze
PVD	Physical Vapour Deposition	Fyzikální depozice z plynné fáze
DLC	Diamond Like Carbon	Uhlík podobný diamantu
PLC	Polymer Like Carbon	Uhlík podobný polymeru
PA CVD	Plasma Assisted CVD	Chemická depozice za použití plazmy
a-C	Amorphous Carbon	Amorfní uhlík
a-C:H	Amorphous Hydrogenated Carbon	Hydrogenovaný amorfní uhlík
ta-C	Tetrahedral Amorphous Carbon	Tetrahedrální amorfní uhlík
LOM	Light Optical Microscopy	Světelná optická mikroskopie
SEM	Scanning Electron Microscopy	Skenovací elektronová mikroskopie.
WCC	Tungsten Carbon Carbide	DLC vrstva s obsahem wolframu

1. Úvod

Historie ledního bruslení je velmi dlouhá. Nejstarší známý pár bruslí pochází z roku přibližně 3000 př. n. l. Byly vyrobeny z tehdy dostupných materiálů – plochá skluzná část (tzv. runner) ze zvířecí kosti se k noze upevňovala pomocí kožených pásků. První použití kovového runneru (konkrétně měděného) je z roku 200 n. l. Přibližně až do roku 1500 se k pohybu na bruslích používalo odstrkávání hůlkami. Poté se v Holandsku objevily brusle s nabroušeným břitem, které umožnily bruslit pouze pohybem nohou podobně, jak to známe dnes. Současnou podobu začaly lední brusle získávat v období průmyslové revoluce. Ocelový břit jako první použil v roce 1895 Američan Jackson Haines. [1], [2], [3]



Obr. 1: Lední brusle z období středověku vyrobené z kostí [2]

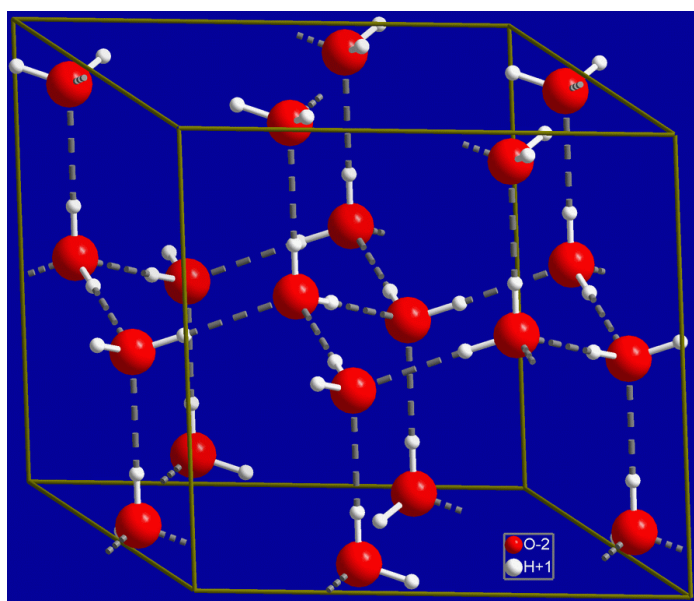
V dnešní době se používají zcela výhradně ocelové břity ledních bruslí, které podléhají adhezivnímu a abrazivnímu opotřebení, a je proto potřeba je brousit. Pro zlepšení kluzných vlastností a pro prodloužení životnosti materiálů v různých aplikacích se často používá depozice tenkých tvrdých vrstev na povrch substrátu. Tyto vrstvy se používají ve strojírenství (obráběcí nástroje, třecí dvojice, atd.), elektrotechnice, energetice, dekorační technice atd. Tato práce si klade za cíl odpovědět na otázku, zda lze povlakováním ostří bruslí efektivně zlepšit jejich kluzné vlastnosti. Pro tyto účely budu pracovat s technologiemi depozice z plynné fáze – CVD (Chemical Vapour Deposition) a PVD (Physical Vapour Deposition). [2], [4]

2. Základní vlastnosti ledu a ledních bruslí

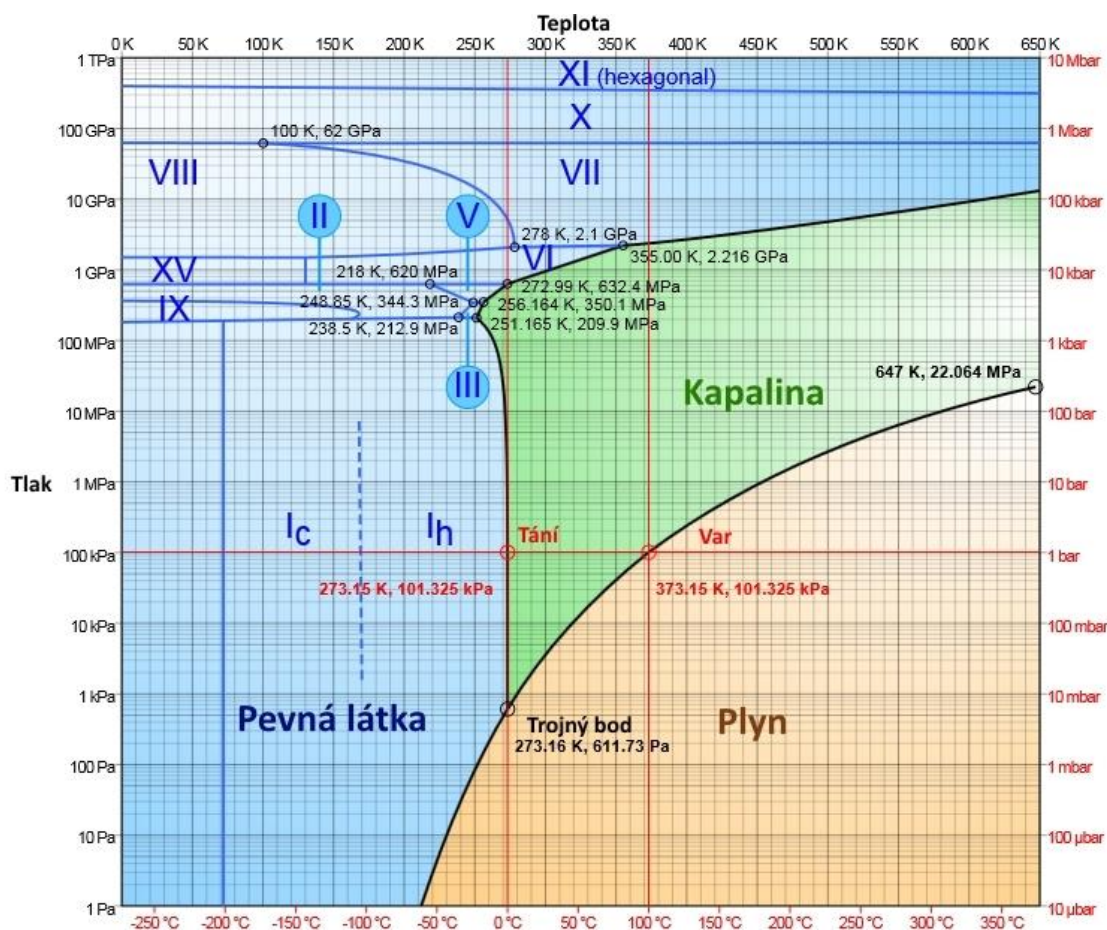
Na následujících řádcích bych rád stručně nastínil vlastnosti obou členů třecí dvojice, se kterou budeme pracovat – tedy ledu a ledních bruslí.

2.1. Vlastnosti ledu

Ledem se nazývá pevné skupenství vody H_2O . Za běžných podmínek jde o krystalickou látku. Zatím je známo 17 krystalických modifikací, 3 amorfní fáze a 2 druhy tzv. supersonického ledu/vody (fáze na přechodu mezi pevným a kapalným skupenstvím). Z rovnovážného fázového diagramu vody (obr. 3) lze odečíst, že za normálních atmosférických podmínek existuje pouze jedna krystalická modifikace ledu, a to tzv. led I_h krystalizující v hexagonální soustavě (obr. 2). [5], [6]

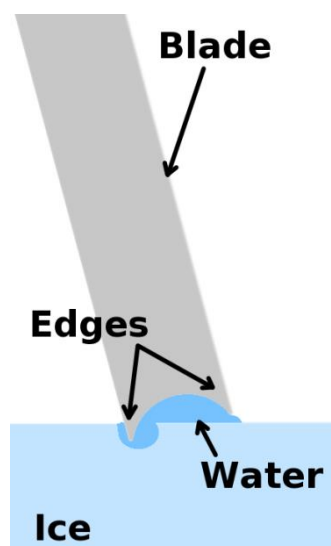


Obr. 2: Hexagonální uspořádání ledu I_h [5]



Obr. 3: Fázový diagram vody [5]

Důležitou vlastností ledu je jeho kluzkost. Koeficient smykového tření mezi ledem a ocelí je velmi malý. Uvádí se 0,03 (statický), resp. 0,015 (smykový). [7] Konkrétní hodnota koeficientu závisí na více faktorech - např. na teplotě a složení ledu, materiálu a geometrii klouzajícího objektu a na rychlosti pohybu. Všeobecně však jde o velice nízké hodnoty, které se vysvětlují tím, že při kontaktu břitu s ledem mezi nimi vniká vrstva kapalné vody, která tření snižuje (obr. 4). [1]



Obr. 4: Schéma kontaktu brusle a ledu [1]

Pro vysvětlení existence kapalně mezivrstvy existují 3 teorie:

- **Tání tlakem:** z fázového diagramu je zřejmé, že zvyšováním tlaku až do 210 MPa klesá teplota tání ledu. Je však také vidět, že kapalná voda se nemůže vyskytovat při teplotách nižších než -22°C . Navíc tlak vyvozený bruslemi je v řádech desetin MPa a pokles teploty tání v setinách $^{\circ}\text{C}$. Tento mechanismus vzniku kapalně mezivrstvy má tedy ve skutečnosti jen velmi malý vliv při teplotách velmi blízko teplotě 0°C . [8], [9]
- **Tání frikčním teplem:** Při pohybu bruslí po ledě dochází k vývinu tepla, které rozpouští led a tím vzniká kapalná mezivrstva. Tento mechanismus je prokázán a lze podle něj usoudit, že méně tepelně vodivé, izolované břity s menší tepelnou kapacitou (menším objemem kovu) by měly předat více vyvinutého tepla do ledu a tím snížit tření. Nevysvětluje se tím však velmi nízký koeficient statického tření, při kterém teplo nevzniká a led je přesto kluzký. [8], [9]
- **Kvazi-kapalná povrchová vrstva:** Molekuly na povrchu ledu jsou slaběji vázány. To jim umožňuje větší volnost kmitání, a tak se chovají jako kapalina. Vysvětluje se tím kluzkost i hluboko pod bodem mrazu i bez vývinu třecího tepla.

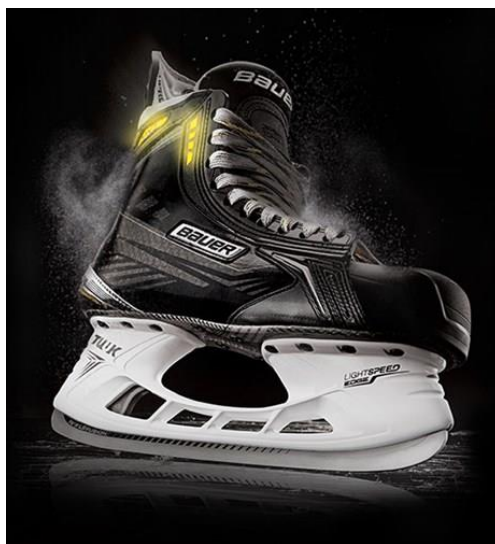
Na druhou stranu tato vrstva je velice tenká a někteří vědci proto pochybují o tom, jak velký je její vliv na snížení tření. [8], [9]

Kluzkost ledu tak ani dnes není zcela jednoznačně objasněna. Všeobecně se přijímá názor, že na kluzkosti ledu se různou měrou podílí všechny tři uvedené mechanismy. [8], [9]

2.2. Konstrukce ledních bruslí

Základními součástmi brusle jsou: nůž (runner), bota a případně držák nože (holder). Konstrukce bruslí se liší podle sportu, ke kterému jsou určeny. Známe tak brusle hokejové, krasobruslařské, rychlobruslařské atd. [2] Na následujících řádcích budu hovořit o břitech hokejových bruslí.

Konvenční systém hokejových bruslí je zobrazen na obr. 5. Vysoký ocelový nůž se upíná do polymerového držáku, který je přinýtován k botě (z velké části rovněž polymerové). [2]



Obr. 5: Konvenční hokejová brusle
(Zdroj: <http://www.bauer.com>)

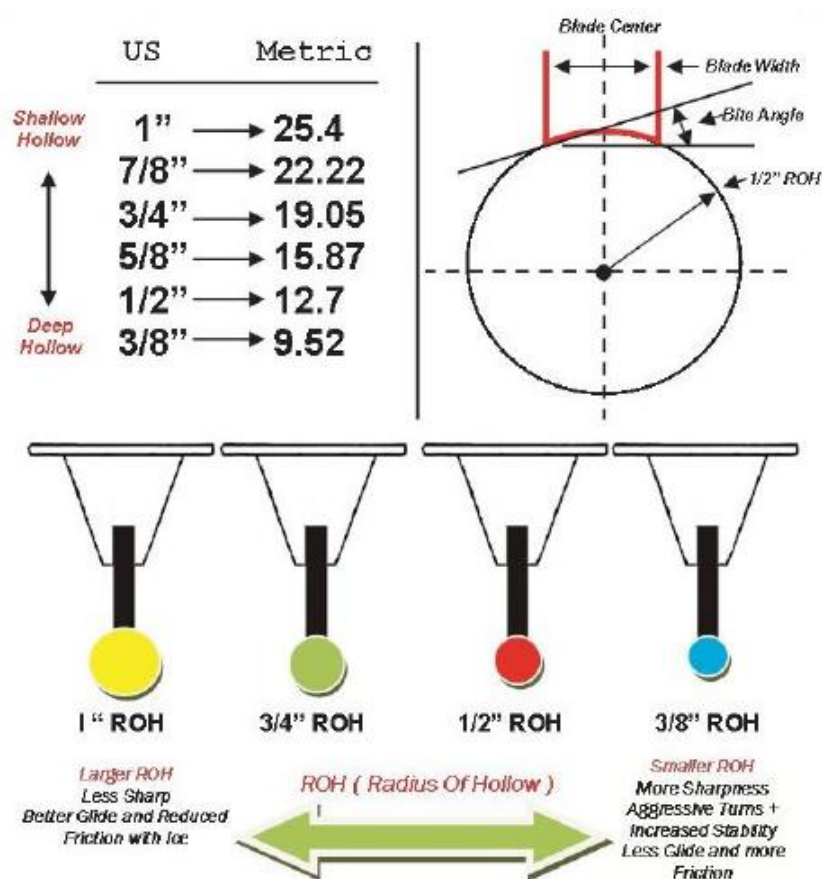
Z hlediska životnosti nožů je rozhodující materiál, ze kterého jsou vyrobeny. Výrobci však nezveřejňují příliš detailní informace o použitých materiálech. Nejčastěji se vyskytují nože ze zušlechtěné uhlíkové oceli, které mohou být povlakovány tvrdým chromováním. Jde o materiál, jehož výhodou je poměrně nízká cena. Naopak zaostává v odolnosti proti opotřebení a korozivzdornosti. Alternativou je použití korozivzdorné oceli (martenzitické či duplexní). Ta naopak přináší delší životnost za větší cenu. Dosahované tvrdosti materiálů se pohybují maximálně do hodnoty 64 HRC. [10]

V současné době se na trhu začínají prosazovat ocelové nože s DLC (diamond like carbon) povlakem od firmy Black Edge naneseným na stranách nože (obr. 6). Výrobce uvádí tvrdost povlaku až trojnásobně vyšší, než u základního materiálu. Díky tomu se dosahuje delší životnosti (prodloužení intervalu mezi broušeními) a lepších vlastností při zatáčení a brzdění. Výrobce se rovněž chlubí sníženým třením až o 20%. Cena oproti standardním nerezovým nožům je vyšší zhruba o třetinu. [11], [12]



Obr. 6: Nůž povlakovaný DLC [11]

Břity bruslí podléhají opotřebení. Jde o kombinaci adhezivního a abrazivního mechanismu opotřebení. Břity musí mít správnou geometrii profilu, aby umožnily bruslařovi dobrý skluz a ovladatelnost. Geometrie profilu se vytváří (a po opotřebení obnovuje) pomocí broušení. Nevýhodami broušení jsou jednak náklady na jeho provedení a hlavně tepelné ovlivnění materiálu nože. To vede k jeho degradaci a zkracuje jeho životnost. Nože se brousí do konkávního tvaru (obr. 7) a jeho poloměr, který se může po délce ostří měnit, určuje vlastnosti při bruslení. Větší poloměr pod sebou lépe drží vodní vrstvu a dosahuje tak nižšího tření. Menší poloměr má ostřejší hrany, které jsou vhodné pro agresivnější zatáčení. [10], [13]



Obr. 7: Geometrie břitu brusle [13]

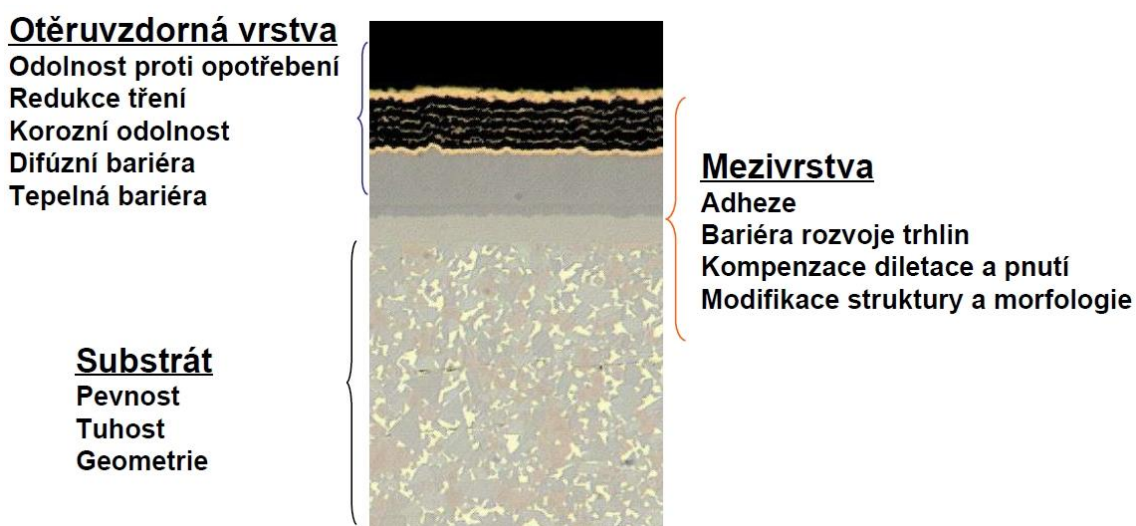
2.3. Opotřebení břitů ledních bruslí

Při bruslení jsou nože vystaveny několika druhům namáhání, které mohou vést k degradaci jejich vlastností, či k jejich úplné destrukci. Břity přenáší veškeré síly, které bruslař při pohybu vyvíjí. Nože jsou tak dynamicky namáhány a musí tedy být dostatečně pevné a zároveň houževnaté. Břity jsou rovněž vystaveny vysokým kontaktním tlakům, jelikož celá váha bruslaře a síly vyvíjené při pohybu se přenáší na led přes velmi malou plochu. To vede k opotřebení povrchu, které zhoršuje vlastnosti, které má břit po nabroušení. Opotřebením se jednak snižuje ostrost nože, což snižuje efektivitu bruslení při odrazech, zatáčení a brzdění. Druhým důsledkem je zvýšení drsnosti povrchu nože, čímž roste koeficient smykového tření a zhoršuje se skluz. Opotřebení povrchu břitu brusle probíhá v místě kontaktu s ledem zejména dvěma mechanismy – adhezivně a abrazivně. V obou případech je pro ochranu materiálu vhodné dosáhnout co nejvyšší tvrdosti a co nejnižší drsnosti povrchu. [10]

- **Adhezivní opotřebení:** Vzniká při relativním pohybu dvou dotýkajících se těles. V důsledku nerovností povrchu (drsnosti) dochází k lokálnímu kontaktu v proměnlivém počtu dotykových míst, v nichž působí adhezivní síly. Vlivem plastických deformací dochází k tvorbě výstupků a jejich následnému usmýknutí, což vede k odstraňování drobných částeczek materiálu. [10], [14]
- **Abrazivní opotřebení:** Jde o nežádoucí změnu povrchu tělesa způsobenou vzájemným působením dvou povrchů, nebo funkčního povrchu a abrazivního média. Projevuje se rýhováním a odřezáváním částic exponovaného tělesa. V případě bruslení dochází k abrazivnímu opotřebení jednak při kontaktu se samotným ledem, a rovněž s abrazivním médiem. Toto médium je tvořeno vodní vrstvou a částicemi, které byly původně zamrzlé v ledu nebo které jsou produkty opotřebení. [10], [14]

3. Metody depozice tenkých vrstev

Tenkou vrstvou nazýváme materiál o tloušťce od desítek nanometrů po desítky mikrometrů, který je nanesen na povrchu základního materiálu – substrátu. Díky malé tloušťce se vrstvy z fyzikálního pohledu chovají odlišně od objemových materiálů. Na vlastnosti systému (zejména na přilnavost vrstvy) má také vliv druh rozhraní mezi vrstvou a substrátem. To může být spojitě (gradientní) či nespojitě (ostré). Jednotlivé složky systému a jejich vlivy na celkové vlastnosti jsou zobrazeny na obr. 8. [4], [15]

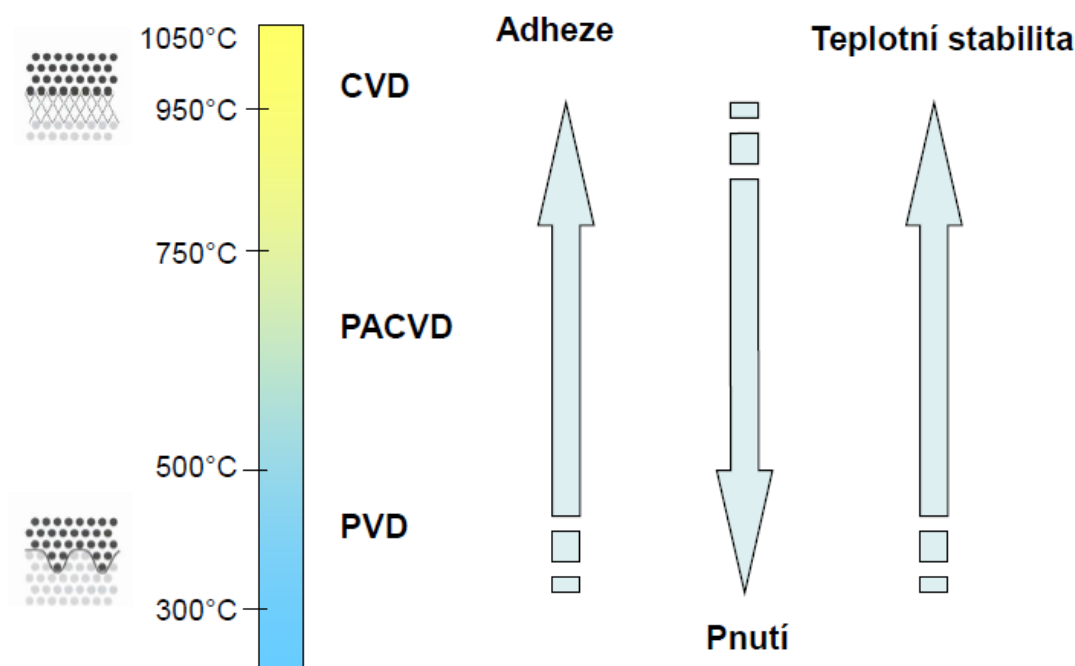


Obr. 8: Systém tenká vrstva-substrát [4]

V současnosti jsou nejpoužívanější technologie vytváření tenkých vrstev depozicí z plynné fáze. Existují tři druhy těchto procesů:

- **CVD** – Chemical Vapour Deposition – chemická depozice z plynné fáze,
- **PA (PE) CVD** – Plasma Assisted (Plasma Enhanced) Chemical Vapour Deposition – plazmou podporovaná chemická depozice z plynné fáze,
- **PVD** – Physical Vapour Deposition – fyzikální depozice z plynné fáze.

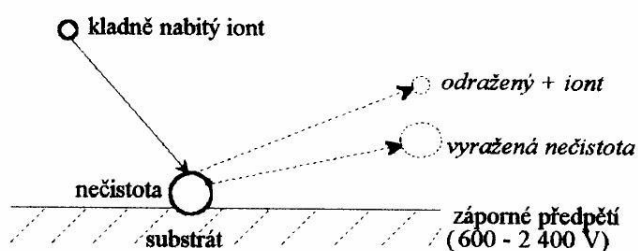
Odlišnosti procesů (zejména depoziční teplota) se projevují na výsledných vlastnostech povlaku (viz obr. 9). [4], [15]



Obr. 9: Vlastnosti vrstev dle použité technologie depozice [4]

3.1. Příprava substrátu

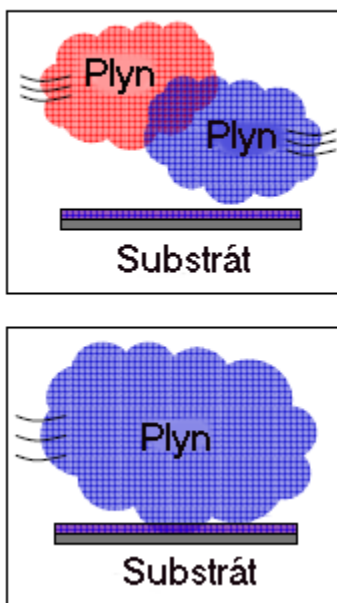
Před provedením depozice musí být substrát důkladně připraven, aby mohla být zaručena dobrá adheze povlaku. Povrch musí být kovově lesklý a zbavený organických a anorganických nečistot. Substrát je před povlakováním již v hotovém stavu, po depozici již nebude probíhat např. tepelné zpracování. Povrch substrátu před depozicí musí být kovově čistý – upravený broušením či leštěním (drsnost $R_z = 0,4$ až $1,2 \mu\text{m}$). Dále je potřeba mechanicky odstranit všechny makronečistoty. V následující fázi se chemickým způsobem odstraňují organické a anorganické nečistoty. Nakonec se často zařazuje čištění pomocí iontového bombardování (obr. 10). Kationty kovu nebo procesního plynu (obvykle Ar, H_2 nebo N_2) dopadají s kinetickou energií cca 10 eV na povrch substrátu, na který je přivedeno záporné předpětí. Důsledkem dopadu iontů je vyražení nečistot z povrchu a také ohřev povrchu, což napomáhá k dosažení depoziční teploty. [4], [16], [17]



Obr. 10: Iontový bombard [16]

3.2. Chemická metoda depozice – CVD

CVD je metoda depozice povlaku z plynné fáze (obr. 11). K povrchu substrátu je přiváděna směs plynů, tzv. prekurzorů. Důsledkem vysoké teploty (u konvenční CVD metody okolo 1000°C) dochází v objemu plynu a na rozhraní pevné a plynné fáze k chemickým reakcím. Jde o heterogenní reakce, jejichž produkty jsou kromě těkavých také pevné látky, které tvoří povlak. V závislosti na podmínkách mohou reakce probíhat různě. Rozhodující je tzv. stupeň přesycení (poměr parciálních tlaků reakčních plynů v okolí substrátu a rovnovážných parciálních



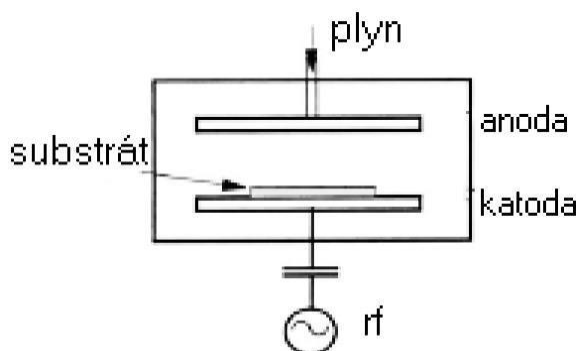
Obr. 11: Princip CVD [4]

tlaků) a teplota. Přesycení ovlivňuje rychlost nukleace, zatímco teplota substrátu ovlivňuje rychlost růstu vrstvy. S rostoucím přesycením a klesající teplotou vznikají povlaky polykrystalické až amorfnní. [4], [15], [16]

Touto technologií lze připravit různé vrstvy kovů, polovodičů a sloučenin, a to v krystalickém či amorfnním stavu. Výhodou je vysoká čistota a s tím související dosažení požadovaných vlastností povlaku. Změnou parametrů lze v širokých mezích řídit stechiometrii. Dalšími přednostmi jsou vysoká adheze a odolnost proti opotřebení, možnost povlakovat nepřístupné dutiny, rovnoměrná tloušťka vrstev a jejich vysoká teplotní stabilita. Největší nevýhodou CVD je vysoká depoziční teplota, která nedovoluje použití této technologie u materiálů, u kterých hrozí tepelná degradace (např. u rychlořezných ocelí). Mezi zápory patří také relativně větší zaoblování ostrých hran, vznik tahových pnutí ve vrstvě (vlivem rozdílné tepelné roztažnosti povlaku a substrátu), ekologicky rizikové pracovní plyny (halogenidy kovů), dlouhé pracovní cykly (8 až 10 hodin) a s tím související energetická náročnost. [4], [15]

3.3. Chemická metoda depozice za použití plazmy – PACVD

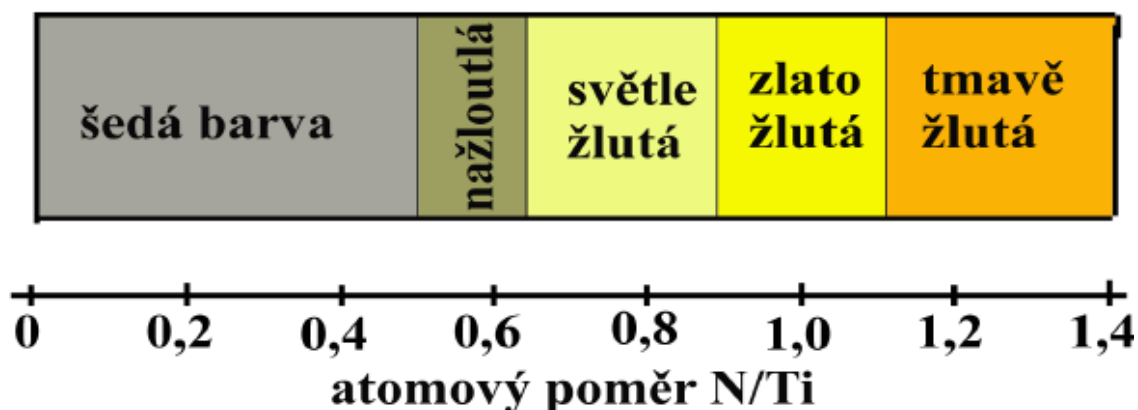
PACVD (Plasma Assisted) či PECVD (Plasma Enhanced) je modifikací výše popsané CVD metody. Rozdíl je ve zvýšení energie plyné atmosféry v komoře její ionizací a aktivací v plazmatickém výboji. Běžně se používá metoda RF PACVD (Radio Frequency), kde je zdrojem ionizace vysokofrekvenční výboj (100 kHz až 40 MHz) při nízkém tlaku (cca 7 až 700 Pa), viz obr. 12. Jiným zdrojem aktivace může být laser (L CVD), mikrovlnné záření (MW CVD) nebo plasmový impuls (PI CVD). V prostředí plazmy dochází k rozkladu molekul plynu na excitované i neexcitované atomy, ionty, elektrony, volné radikály atd. Díky tomu dochází k chemickým reakcím při výrazně nižších teplotách, než je tomu u konvenční CVD metody. Nižší procesní teploty (okolo 500°C) umožňují povlakovat i substráty z teplotně citlivých materiálů. [4], [16], [18]



Obr. 12: Schéma RF PACVD [16]

Zařízení pro PECVD umožňují po dosažení procesní teploty provádět iontové čištění substrátu, plazmovou nitridaci a samotné nanášení povlaku. Vrstva na povrchu záporně nabitého substrátu (katody) roste v důsledku vylučování kladně nabitých iontů z plazmy (Ti^+ , N^+ atd.). Řízením parametrů procesu vznikají vrstvy s požadovaným složením a vlastnostmi. Díky nízké teplotě je zanedbatelná difuze mezi substrátem a vrstvou, případně mezi různými vrstvami. To umožňuje tvorbu tzv. multivrstev, kdy se vrstvy s odlišným složením střídají, přičemž jejich rozhraní fungují jako bariéry proti šíření trhlin, nebo gradientních vrstev s lepší adhezí k substrátu. [18], [19]

Jako povlakové materiály se používají karbidy a nitridy kovů (Ti, W, Cr, Al, Si, Ag), Al_2O_3 nebo amorfní uhlík (DLC vrstvy, viz kap. 3.5). Velmi rozšířené jsou povlaky z nitridu titanu TiN a karbidu titanu TiC. Tyto sloučeniny mají stejnou krystalovou mřížku, díky čemuž je lze mísit v karbonitrid titanu $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$. Barva povlaku napovídá o poměru jednotlivých prvků (obr. 13). Nitrid titanu je zlatavý, zatímco karbid titanu je kovově šedý. [15], [17]



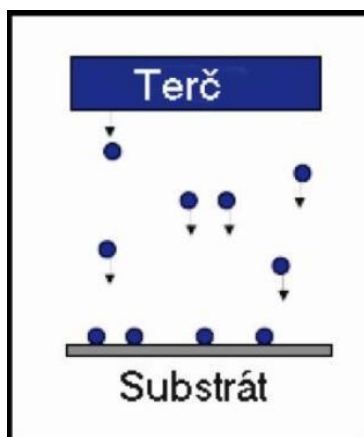
Obr. 13: Barvy povlaků $Ti(C,N)$ [15]

Výhodami PECVD jsou nižší teploty depozice oproti CVD, vyšší přesnost a možnost vytváření multivrstev a gradientních vrstev. Nevýhodou je zejména problematické povlakování v dutinách a drážkách vzhledem k charakteru použitého výboje (tzv. efekt duté katody). [4], [15]

3.4. Fyzikální metoda depozice – PVD

Principem fyzikální metody depozice je odpařování (technologie napařování) či odprašování (technologie naprašování) povlakového materiálu z pevného terče, tzv. targetu (viz obr. 14). V případě potřeby lze do komory vpustit aktivní plyn (dusík či plyn obsahující uhlík), který s parami kovu vytvoří chemickou sloučeninu. Částice povlakového materiálu jsou pak transportovány k povrchu substrátu, kde vytváří požadovanou vrstvu. Proces probíhá v prostředí vysokého vakua a při poměrně nízkých teplotách (150 až 500°C). Díky nízkým depozičním teplotám lze tímto způsobem povlakovat nejen teplotně citlivé kovy (rychlořezné oceli, hliník), ale např. i polymery. V současnosti se metoda PVD provádí třemi způsoby: [4], [16], [17]

- **Napařování** – převod do plynné fáze teplem,
- **Naprašování** – převod do plynné fáze iontovým bombardováním,
- **Iontová implantace** – ionty urychlené a namířené v elektromag. poli.



Obr. 14: Princip PVD [4]

Pomocí PVD lze deponovat široké spektrum povlaků. Kromě již výše popsaných TiN/Ti(C,N) to jsou např. CrN/Cr(C,N), Zr(C,N), případně ternární povlaky (Ti,Al)N, (Ti,Cr)N, (Ti,Cr)N, (Al,Cr)N či kvartérní povlaky (Ti,Al,Si)N, (Ti,Al,V)N atd. Nanášet lze i povlaky z Al_2O_3 a probíhá výzkum depozice kubického nitridu bóru či různých nanovrstev (s tloušťkou kolem 10nm). Každý povlak, případně vícevrstvá kombinace různých povlaků, má své specifické vlastnosti: tvrdost a adhezi (tj. odolnost proti opotřebení), tribologické vlastnosti, chemickou a korozní odolnost, teplotní stabilitu. Technologie PVD umožňuje mnohem přesněji řídit tloušťku, chemické složení, stechiometrii, zrnitost a krystalografii vznikajícího povlaku. [17], [19]

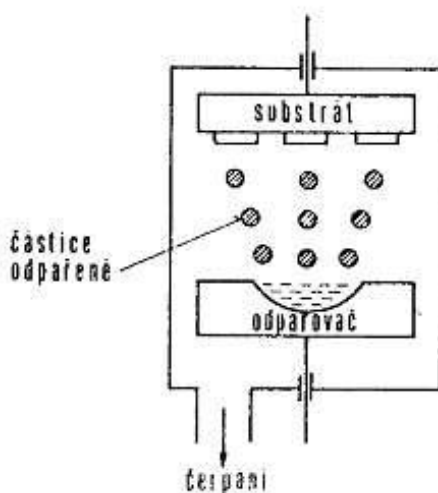
Největší výhodou technologie povlakování PVD je nízká procesní teplota, která umožňuje povlakovat teplotně citlivé substráty. Oproti CVD mají PVD povlaky menší vnitřní napětí a lze vytvořit velké množství různých vrstev a multivrstev s přesnou a snadno reprodukovatelnou tloušťkou. Dalším kladem je ekologická šetrnost, protože během procesu se nepoužívají ani nevznikají žádné toxické látky. Nevýhodou může být horší adheze k substrátu (vlivem menšího difuzního spojení) a menší teplotní stabilita (viz obr. 9). [4], [17]

3.4.1. PVD napařování

Podstatou této metody je odpařování či sublimace materiálu targetu působením tepla a následná kondenzace par na povrchu substrátu (obr. 15). K ohřevu targetu lze použít:

- Odporový ohřev,
- Indukční ohřev,
- Elektronový svazek,
- Laser,
- Obloukový výboj.

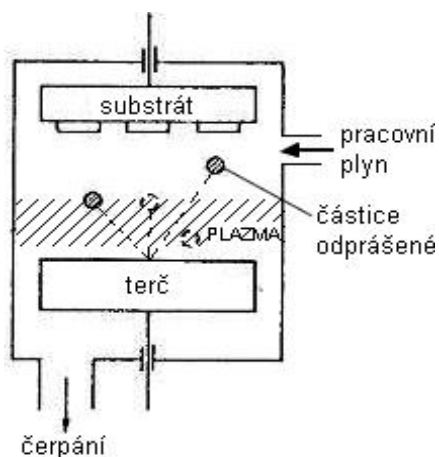
Napařování se provádí při velmi nízkém tlaku (10^{-3} až 10^{-8} Pa), což značně snižuje teplotu vypařování a brání oxidaci. V případě povlakování přímo materiálem targetu (obvykle kovem s nízkou teplotou tání) je přítomen inertní plyn o velmi malém tlaku. Při povlakování např. karbidy či nitridy kovů se používá tzv. reaktivní napařování, kde je do komory přiveden aktivní plyn, který chemicky reaguje s parami kovu a na povrchu substrátu pak vzniká vrstva chemické sloučeniny. [4] [15], [20], [21], [22]



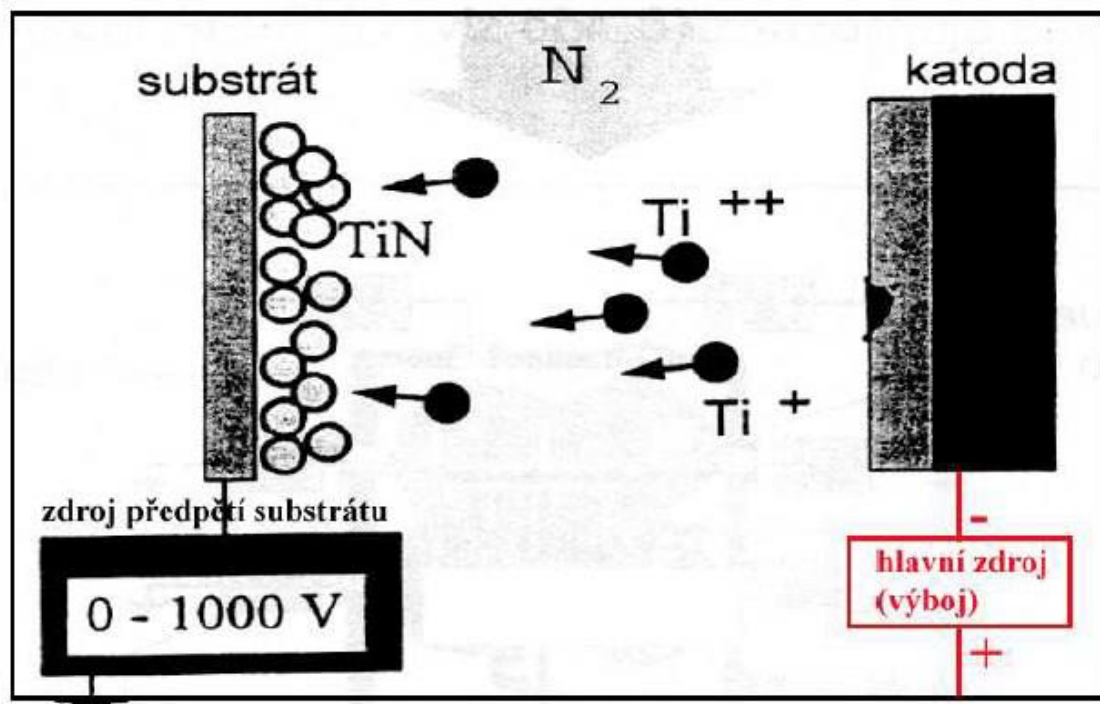
Obr. 15: Schéma napařování [20]

3.4.2. PVD naprašování

Tato technologie funguje na principu odprašování částic targetu (katody) při dopadu energetických kationtů plazmatu pracovního plynu (obvykle jde o ionty Ar^+), viz obr. 16. Většinou se používá doutnavý výboj v inertním plynu o malém tlaku (10^{-2} až 10^{-5} Pa). Stejně, jako u napařování, lze využít chemické reakce s aktivním plynem (pak hovoříme o reaktivním naprašování). Odprašené částice targetu mohou průchodem oblastí ionizovaného plynu samy ionizovat. Nakonec kondenzují na povrchu substrátu, kde vytváří požadovanou vrstvu. Pokud na substrát přivedeme záporné předpětí (až 1000V), urychlí se tím pohyb kationtů povlaku a hovoříme o iontovém plátování (obr. 17). Naprašování se oproti napařování vyznačuje přesnějším přenášením složení terče, vyšší mírou homogeneity depozice a lesklejším povrchem. [4], [15], [20], [21], [22]



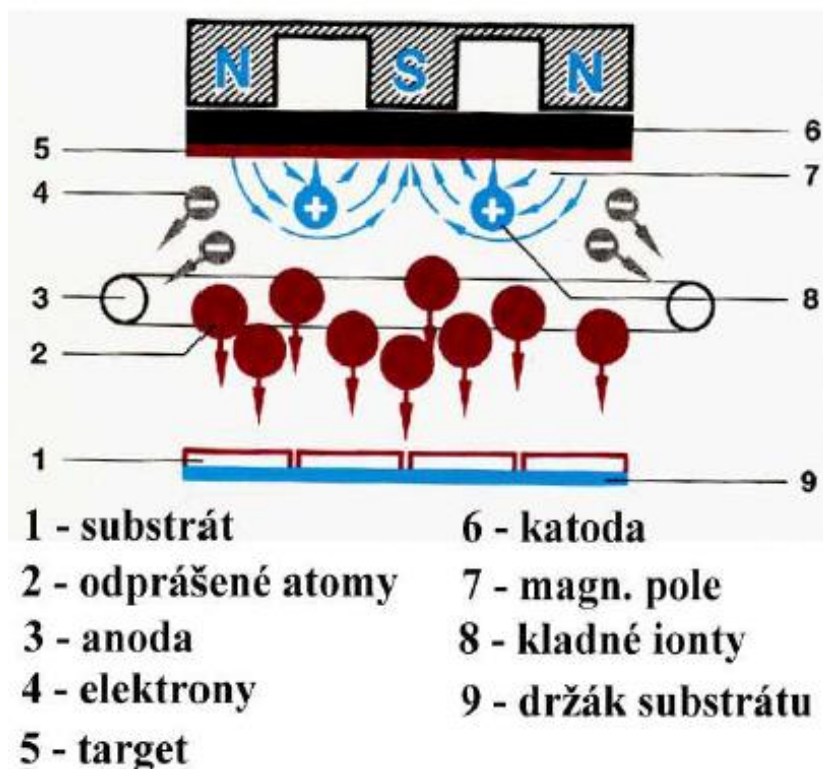
Obr. 16: Schéma naprašování [20]



Obr. 17: Schéma iontového reaktivního plátování [15]

3.4.3. PVD magnetronové naprašování

Použití planárního magnetronu (obr. 18) při naprašování je výsledkem snahy o zvýšení účinnosti ionizace pracovního plynu. K tomu je potřeba co nejvíce prodloužit skutečnou dráhu elektronů v okolí odprašovaného terče. Magnetron umístěný v blízkosti targetu (na obr. 18 nahoře) vytváří magnetické pole, ve kterém driftují elektrony plazmatu, a prodlužuje se tak jejich dráha. Díky tomu roste počet srážek a tvoří se hustší plazma. Kladné ionty plazmatu pak dopadají na terč (katodu), čímž dochází k odprašování. Výhodou je větší intenzita ionizace při používaném tlaku (asi 1 Pa) a možnost rovnoměrně povlakovat větší plochy. [4], [15], [23]



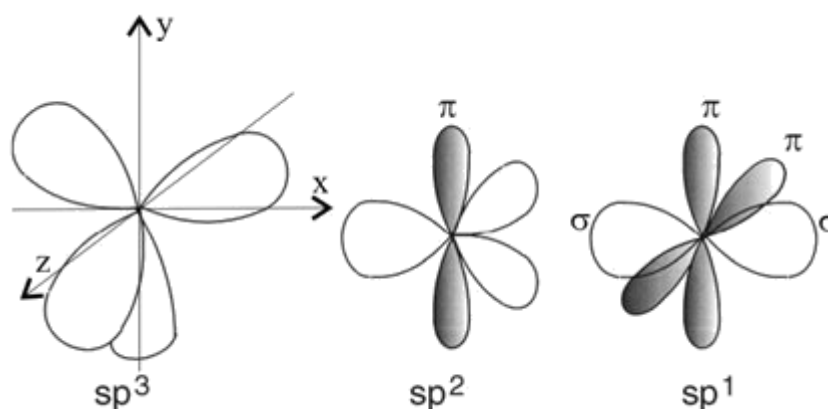
Obr. 18: Princip planárního magnetronu [15]

3.5. Uhlíkové vrstvy podobné diamantu – DLC

Diamantu podobné vrstvy se intenzivně vyvíjí již od začátku 80. let 20. století. Zájem o ně je vyvolaný především jejich tribologickými vlastnostmi (vysokou tvrdostí a malým součinitelem smykového tření), ale i možnostmi jejich využití jako polovodičového či optického materiálu. [16]

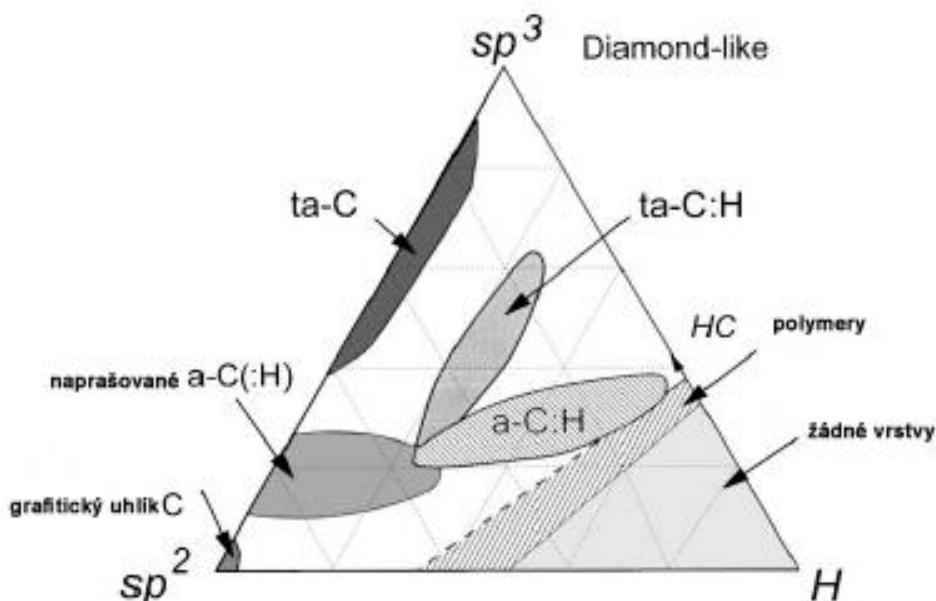
Pojmem DLC se označuje vrstva převážně amorfního uhlíku (a-C) nebo hydrogenovaného (vodíkem dopovaného) amorfního uhlíku (a-C:H) obsahující velký podíl metastabilních sp^3 vazeb (což je konfigurace diamantu). Vrstva může být případně dopována ještě jinými prvky, obvykle za účelem snížení vnitřního napětí (např. dusíkem, křemíkem či atomy kovu) nebo ke snížení tření (fluorem). Uhlík může existovat ve třech různých tzv. hybridizačních stavech, které se liší uspořádáním svých čtyř valenčních elektronů: sp^1 , sp^2 a sp^3 (obr. 19). Díky tomu tvoří

uhlík velké množství krystalických i neuspořádaných struktur. V konfiguraci sp^1 dva valenční elektrony tvoří π vazbu ve směru osy x a zbylé dva tvoří σ vazbu ve směrech y a z. V konfiguraci sp^2 , která náleží grafitu, tvoří tři elektrony σ v jedné rovině a zbylý elektron vazbu π . V konfiguraci sp^3 , která odpovídá diamantu, jsou valenční elektrony nasměrovány do čtyřstěnu a s ostatními atomy tvoří velmi silné σ vazby. [16], [24], [25], [26]



Obr. 19: Hybridizační stavy uhlíku [24]

V uhlíkových vrstvách je v závislosti na způsobu depozice různý poměr sp^2 a sp^3 uhlíku a případně vodíku. Mohou tak existovat různé fáze, jak ukazuje ternární fázový diagram na obr. 20. Povlaky s různým poměrem jednotlivých složek se liší mechanickými a chemickými vlastnostmi. Při depozici iontů s nízkou energií (méně než 100 eV) vznikají poměrně měkké, polymerům podobné a-C:H vrstvy zvané PLC (Polymer Like Carbon). Naopak při bombardování substrátu ionty s vysokou energií (nad 100 eV) vznikají DLC vrstvy s vysokým obsahem sp^3 uhlíku. Hydrogenované DLC vrstvy obsahují maximálně 60% vodíku, běžně se obsah vodíku pohybuje v rozsahu 10 až 35%. Mezi DLC vrstvy řadíme rovněž bezvodíkové vrstvy amorfního uhlíku a-C (obsah H < 1%) a tetrahedrálního amorfního uhlíku ta-C (takto se označuje a-C vrstva neobsahující vodík a s podílem sp^3 vazeb > 80%). [16], [24], [26]



Obr. 20: Ternární fázový diagram a-C:H [16]

DLC vrstvy jsou deponovány pomocí výše popsaných technologií PVD a PACVD. Bezvodíkové a-C vrstvy se vytváří metodami PVD, a to katodovým obloukovým odpařováním nebo magnetronovým naprašováním z uhlíkového terče. Hydrogenované a-C:H vrstvy se nanášejí metodou PACVD pomocí RF, pulzního nebo mikrovlnného výboje v prostředí uhlovodíkového plynu (acetylen, metan apod.). Teploty depozice se pohybují od pokojové až do 250°C, jelikož při vyšší teplotě může docházet ke grafitizaci. [24], [26]

Vlastnosti DLC vrstev se liší dle složení (viz tab. 1). Obecně se vyznačují vysokou tvrdostí (10 až 60 GPa), nízkým součinitelem smykového tření ($< 0,1$), vysokou otěruvzdorností a vysokým tlakovým vnitřním pnutím (až 10 GPa). Jsou rovněž chemicky odolné, opticky transparentní a mají vysoký elektrický odpor. Tyto vlastnosti je předurčují k použití v automobilovém průmyslu a strojírenství (třecí dvojice, nástroje), lékařství (implantáty, nástroje), optice (lasery) či elektronice (povlaky pevných disků, izolace v mikroelektronice). [26]

Tabulka 1: Vlastnosti různých DLC vrstev [25]

Forma uhlíku	% sp ³	Tvrdost [GPa]	% H	Hustota [g/cm ³]	[eV]
Diamant	100	100	--	3,5	55
Grafit	0	--	--	2,267	0
a-C (vypařený)	0	3	--	1,9	0,4–0,7
a-C (naprášený)	5	3	--	2,2	0,5
ta-C	80–88	80	--	3,1	2,5
a-C:H (tvrdý)	40	10–20	30–40	1,6–2,2	1,1–1,7
a-C:H (měkký)	60	<10	40–50	1,2–1,6	1,7–4

4. Metody hodnocení systémů tenká vrstva – substrát

K ověření kvality a různých užitných vlastností vytvořeného systému tenká vrstva – substrát existuje řada metod. Nezastupitelné místo mají stále technologické zkoušky, které systém testují přímo v provozních podmínkách – např. v oboru využití tenkých vrstev na řezných nástrojích jsou to tzv. zkoušky trvanlivosti. Tyto experimenty jsou však časově i finančně náročné a neposkytují všechny požadované údaje. Proto byly vyvinuty různé laboratorní metody zkoušení tenkých vrstev, které odhalují požadované informace. Díky těmto testům lze kontrolovat vlastnosti nanášených vrstev a dále rozvíjet technologie depozice tenkých vrstev. [27]

4.1. Zobrazovací metody strukturní analýzy

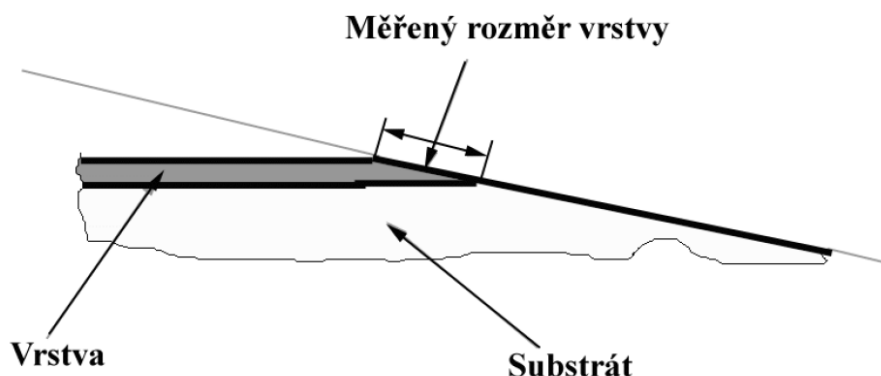
- **Světelná (optická) mikroskopie:** LOM je základní metalografickou metodou zobrazování povrchu. Je založena na principu pozorování viditelného záření odraženého od povrchu vzorku skrze soustavu optických čoček. Zobrazovací schopnost je omezena vlnovou délkou použitého světla a pohybuje se v řádech 10^1 až 10^0 μm . Prakticky použitelné maximální zvětšení je asi 2000x. Zvětšení optického mikroskopu se mění skokově s použitým objektivem. Moderní hardwarové a softwarové vybavení optických mikroskopů umožňuje použít různé metody zvýšení kontrastu (polarizace světla, interference světla atd.), automatické ostření (autofocus), zvýšení hloubky ostrosti (extended focus), pořizování panoramatických snímků velkých vzorků atd. Dále je možná analýza pořízených fotografií, jako měření vzdáleností (např. tloušťek vrstev), měření ploch (např. velikosti zrn), sestavení 3D topografické mapy atd. [28], [29], [30]
- **Skenovací elektronová mikroskopie:** SEM se používá pro pozorování detailů o rozměrech řádově až 10^{-1} μm . Při dopadu primárního svazku elektronů na povrch vzorku dochází k interakcím mezi elektrony a pevnou látkou. Důsledkem toho je emise řady signálů – zpětně odražené elektrody (BSE), sekundární

elektrony (SE), Augerovy elektrony (AE), rentgenové záření, viditelné záření (tzv. katodoluminiscence). Při skenování povrchu, tj. při pohybu elektronového svazku pomocí rastrovacích cívek, dochází v každém bodě vzorku k různým interakcím. Intenzita emitovaného signálu je snímána vhodným detektorem a na obrazovce se projeví odpovídajícím jasným bodem. Snímáním různých signálů lze získat různé informace o vzorku – např. topografický kontrast je tvořen především signálem SE, chemický kontrast pak hlavně signálem BSE. Sledováním charakteristického rentgenového záření lze získat informace o chemickém složení povrchu. Tohoto principu využívá energiově disperzní (EDX, EDS) či vlnově disperzní (WDX, WDS) spektrální analýza. Díky vysokému maximálnímu zvětšení (až 500 000x) lze SEM využít pro přesné měření tloušťky vrstev, studium morfologie, mikrofraktografickou analýzu, studium nanovrstev atd. [28], [30], [31], [32]

4.2. Měření tloušťky tenkých vrstev

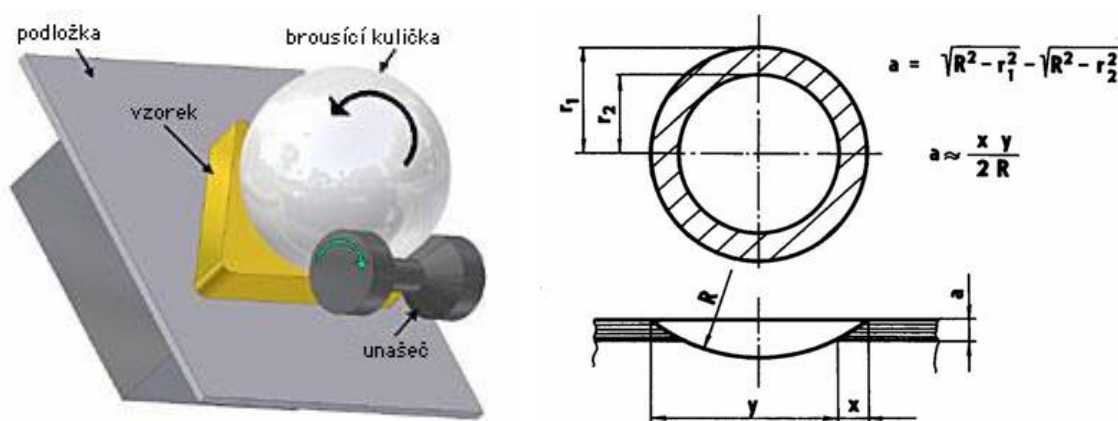
Tloušťka vrstvy je jednou ze základních měřených veličin. U tenkých vrstev se pohybuje v rozmezí desítek nanometrů až desítek mikrometrů. Tloušťku vrstvy lze měřit třemi základními způsoby:

- **Měření tloušťky v řezu:** Tloušťku tenké vrstvy lze měřit na metalografickém výbrusu pomocí LOM, nebo přesněji pomocí SEM. Může se pozorovat na příčném řezu, kde je vrstva obtížněji pozorovatelná, ale jeho příprava je snazší a výsledek je ihned patrný. Druhou možností je provést šikmý řez pod velmi malým úhlem (obr. 21). Vrstva se pak jeví větší, a je proto snadněji pozorovatelná. Příprava vzorku je však obtížnější a skutečná tloušťka povlaku se musí dopočítat (násobením měřeného rozměru sinem úhlu řezu). [15], [16]



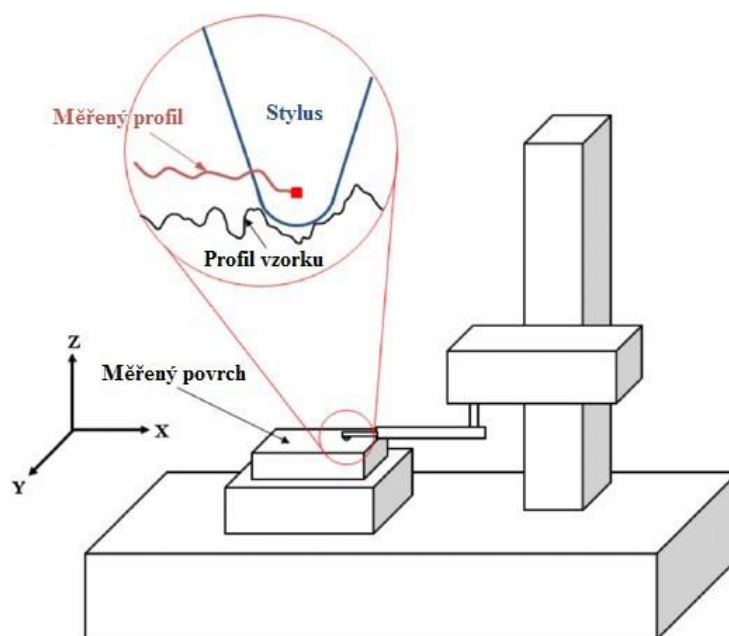
Obr. 21: Měření tloušťky vrstvy pomocí šikmého řezu [15]

- **Kalotest:** Metoda spočívá ve vybroušení kulového vrchlíku do vzorku (obvykle ocelovou kuličkou o průměru 25 mm a diamantovou pastou). Při pozorování pomocí LOM se vrstva na substrátu jeví jako mezikruží (obr. 22). Po mikroskopickém proměření poloměrů lze vypočítat tloušťku vrstvy. Oblast použití je 1 až 100 μm . Lze měřit i jednotlivé složky multivrstev. Max. přípustná drsnost povrchu povlaku $R_a = 0,4 \mu\text{m}$. [16]



Obr. 22: Schéma kalotestu (vlevo) a princip vyhodnocení (vpravo) [16]

- **Měření mechanickým profilometrem:** Jde o efektivní metodu měření tloušťky a drsnosti povlaku. Při depozici se zabrání povlakování části povrchu substrátu jeho zakrytím. Pomocí mechanického profilometru (obr. 23) pak lze změřit výšku vrstvy. Zařízení funguje tak, že dochází ke kontaktu hrotu (tzv. stylus) s povrchem vzorku při daném zatížení (obvykle 1 až 50 mg). Při pohybu po povrchu se měří vychýlení hrotu (rozlišení řádově v nm). Mechanickým profilometrem lze měřit nejen tloušťku vrstvy, ale i morfologii povrchu – lze měřit drsnost či sestavit 3D mapu povrchu. [33]

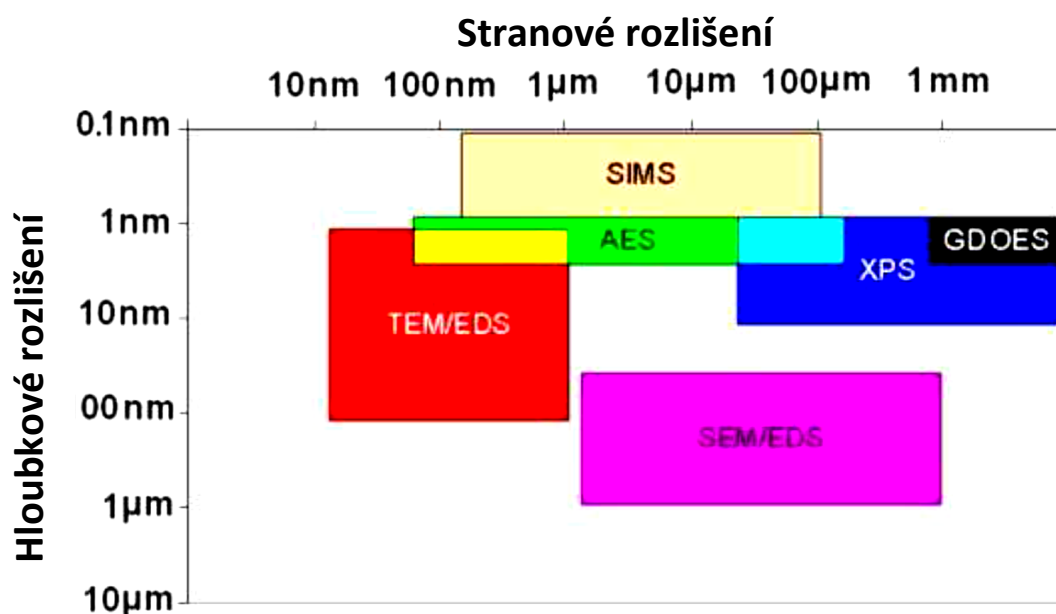


Obr. 23: Schéma mechanického profilometru
(Zdroj: http://ej.iop.org/images/0957-0233/23/10/105601/Full/mst430231f1_online.jpg)

4.3. Analýza chemického složení

Pro určení chemického složení povrchové vrstvy existuje celá řada různých spektroskopických metod. Jejich společným znakem je analýza dějů spojených s přechody valenčních elektronů v atomech po jejich vybuzení (excitaci). Sleduje se spektrum emitovaného (případně absorbovaného) záření. Metody se liší ve způsobu buzení a také v druhu sledovaného signálu. Z těchto rozdílů vyplývá odlišná

informační hloubka či stranové rozlišení (obr. 24), což určuje i využitelnost jednotlivých metod. [34], [35]



Obr. 24: Úrovně rozlišení některých spektroskopických metod [35]

- **Elektronová mikroanalýza (EDS, WDS):** Jde o metodu analýzy spektra charakteristického rentgenového záření emitovaného při buzení paprskem elektronů. V praxi se provádí přidáním detektoru rentgenového záření do rastrovacího elektronového mikroskopu. Analýza může být bodová (na ploše cca 100 až 500 nm), liniová či plošná. Výstupem je prvkové složení s přesností až na setiny procenta. Výhodami jsou např. rychlost a kombinace s obrazem ze SEM. Mezi nevýhody patří např. poměrně velká informační hloubka (asi 1 µm), neschopnost detekovat vodík či určit chemické sloučeniny. [32], [35]
- **Augerova elektronová spektroskopie (AES):** Podobně jako v předchozím případě je vzorek excitovaný elektronovým svazkem v komoře SEM. Detektor snímá emisi tzv. Augerových elektronů. Pro AE je charakteristická malá rychlost, z čehož vyplývá i malá hloubka emise. Díky tomu lze zjistit složení vrstvy

o tloušťce cca 1 nm. Lze vytvářet i hloubkové koncentrační profily. Metodou lze analyzovat všechny prvky těžší než helium. [35]

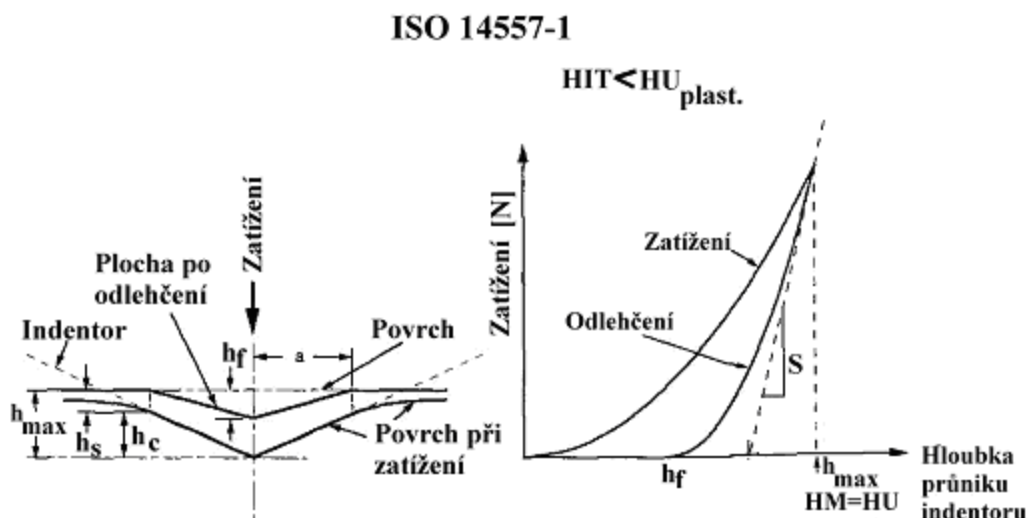
- **Fotoelektronová spektroskopie (PES, ESCA):** Tato metoda je velmi rozšířená a je založena na principu fotoefektu, tj. emise elektronů v důsledku ozáření fotony. Excitace se zpravidla provádí ozářením rentgenovými paprsky (metoda XPS). Informační hloubka je cca 5 nm. Speciálními metodami lze vyhodnocovat i chemické vazby (tj. analyzovat sloučeniny). Nelze však identifikovat vodík. [35]
- **Hmotnostní spektroskopie sekundárních iontů (SIMS):** Principem této metody je iontové odprašování povrchu vzorku energetickým svazkem částic (0,2 až 20 keV), ionizace odprášených částic a jejich analýza pomocí hmotnostního filtru a detektoru. Výhodami SIMS jsou velmi malá informační hloubka (řádově desetiny nm) a vysoká citlivost detekce všech prvků (včetně vodíku) a jejich izotopů a sloučenin. Nevýhodou je destruktivnost procesu. [35]
- **Optická emisní spektroskopie v doutnavém výboji (GDOES):** Jde o modifikaci optické emisní spektroskopie, kde je analyzováno čárové emisní spektrum záření o vlnových délkách 110 až 900 nm. GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) využívá k buzení tzv. Grimmův doutnavý výboj. Analyzovaný vzorek je zapojený jako katoda a výboj probíhá v argonové atmosféře. Ionty Ar^+ dopadají na vzorek a odprašují jej. Odprášené atomy jsou pak excitovány srážkami s elektrony a přitom vyzařují své charakteristické spektrum, které je analyzováno optickým spektrometrem. Sledováním hloubky odprášení lze vytvořit hloubkový koncentrační profil vrstvy (až do hloubky 0,1 mm). Výhodou je informační hloubka srovnatelná s AES (řádově jednotky nm). Nevýhodou naopak může být velká analyzovaná plocha. [16], [34]

4.4. Měření tvrdosti

Tvrdost je definována jako odpor proti vnikání cizího tělesa (proti lokální plastické deformaci). Pro tvrdé otěruvzdorné vrstvy je vysoká tvrdost jedním ze základních parametrů (tab. 2) a udává se zpravidla v GPa. Tvrdost tenkých vrstev se měří vnikací zkouškou pomocí indentoru Vickers, Berkovich nebo Knoop. Při měření je třeba zajistit, aby výsledek neovlivnila tvrdost substrátu. Hloubka vpichu proto smí být maximálně desetina tloušťky vrstvy. Toho lze dosáhnout pouze při použití velmi malého zatížení. Při zatížení do 2 N jde o tzv. **mikrotvrdost**, která je definována jako podíl zátěže k velikosti plochy vtisku. Při zátěži od 0,1 do 10 g (cca 10^{-3} až 10^{-1} N) pak hovoříme o **nanotvrdosti**. Malé vtisky se opticky měří velmi obtížně, proto se vyhodnocení provádí zaznamenáváním závislosti hloubky vtisku na zatížení – výstupem je tzv. indentační křivka (obr. 25). Z té lze určit nejen tvrdost, ale i podíl elastické a plastické deformace a vypočítat modul pružnosti vrstvy. [4], [36], [37]

Tabulka 2: Tvrdosti běžných tenkých vrstev [36]

Vrstva	Tvrdost [GPa]
TiN	23
TiCN	30
CrN	17
TiAlN	33
DLC	25
TiAlSiN	45



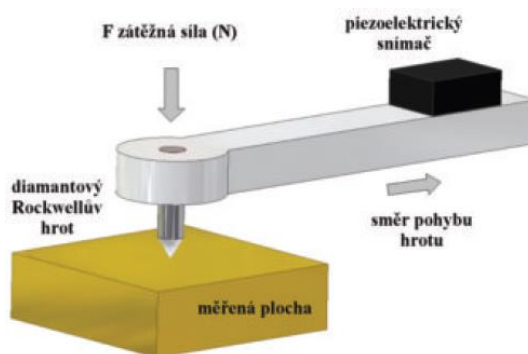
Obr. 25: Schéma měření nanotvrdosti (vlevo) a indentační křivka (vpravo) [37]

4.5. Měření adhezivního chování

Adheze vrstvy k substrátu je dalším důležitým parametrem systému. Dostatečně velké vazebné síly na rozhraní mezi vrstvou a substrátem zajišťují plné využití potenciálu tenké vrstvy. Velikost adhezních sil je dána především parametry depozice (např. velikostí kinetické energie dopadajících atomů či iontů), tloušťkou povlaku, strukturními vlastnostmi substrátu a stavem povrchu (čistotou a drsností). Pro měření adheze tenkých vrstev se nejčastěji používají mechanické zkoušky, a to buď vrypová nebo vnikací. [16]

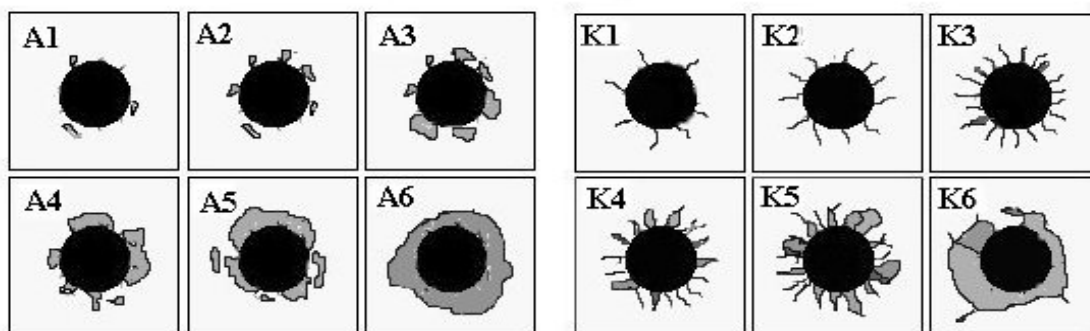
- **Vrypová zkouška – scratch test:** Zkouška probíhá tak, že se po povrchu vrstvy posouvá diamantový Rockwellův indentor (obr. 26), přičemž se postupně zvyšuje normálová zátěžná síla (běžně 20 až 120 N). Přístroj rovněž zaznamenává velikost tangenciální síly, a tak umožňuje stanovit hodnotu koeficientu tření (podíl tečné a normálové síly). Míru adheze vrstvy charakterizuje hodnota normálové síly v okamžiku odtržení vrstvy od substrátu – kritické zatížení. Okamžik odtržení lze stanovit buď vizuálně pozorováním vzniklé stopy pomocí LOM nebo SEM, či přesněji nalezením skoku v grafu průběhu koeficientu

tření nebo akustické emise v závislosti na zatížení. V běžných aplikacích se za dobrou adhezi považuje hodnota větší než 60 N. [4], [36]



Obr. 26: Schéma scratch testu [36]

- **Vnikací zkouška – Mercedes test:** Jde o rozšířenou a nenáročnou metodu měření adheze vrstev. Probíhá tak, že je Rockwellův indentor staticky vtlačován do povrchu vzorku. Vzniklé napětí iniciuje vznik trhlinek či odtržení v okolí vtisku. Vyhodnocení se provádí zařazením vtisku do kategorií (tříd) s adhezním číslem podle charakteru popraskání či odloupenutí vrstvy (obr. 27). [16]



Obr. 27: Hodnocení Mercedes testu [16]

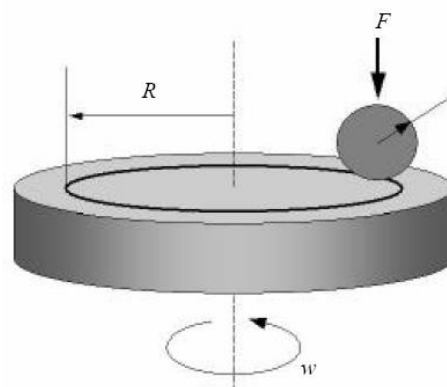
4.6. Zkoušení tribologických vlastností

Tribologie se zabývá sledováním procesů tření a opotřebení. Snížení koeficientu tření vrstvy (tab. 3) je výhodně např. u řezných nástrojů, kde výrazně snižuje tepelné zatížení. K měření koeficientu tření se využívají metody pin-on-disc a ball-on-disc. K testování odolnosti proti mechanickému vibračnímu opotřebení se provádí fretting test. [16], [36]

Tabulka 3: Koeficienty tření některých povlaků [36]

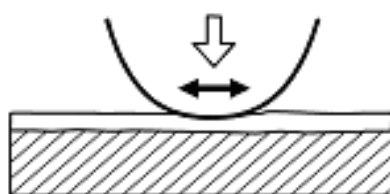
Povlak	Frikční koeficient (proti oceli za sucha)
TiN	0,4
TiCN	0,4
CrN	0,5
TiAlN	0,4
DLC	0,1

- **Pin-on-Disc (Ball on Disc)** Zkouška se provádí v zařízení zvaném tribometr. Princip spočívá ve vtlačování zkušebního tělíska (pinu či kuličky) z libovolného materiálu do rotujícího vzorku ve tvaru disku (obr. 28). Zatížení se pohybuje v rozmezí 1 až 10 N, otáčky vzorku 10 až 500 min⁻¹. Výstupy testu jsou: závislost hodnoty koeficientu tření na počtu cyklů, charakter a velikost opotřebení zkušebního tělíska a vzorku. [16], [36]



Obr. 28: Metoda Ball-on-Disc [16]

- **Fretting test:** Fretting je povrchové únavové opotřebení vlivem kombinace kontaktu dvou součástí a mechanických vibrací. Principem zkoušky je prolešťování vrstvy pinem či kuličkou pohybující se po povrchu vzorku nízkofrekvenčními kmity (obr. 29). Výstupem je průběh koeficientu tření (fretting koeficientu) v závislosti na počtu cyklů a charakter a velikost opotřebení zkušebního tělíska a tribologické stopy na vzorku. [16]

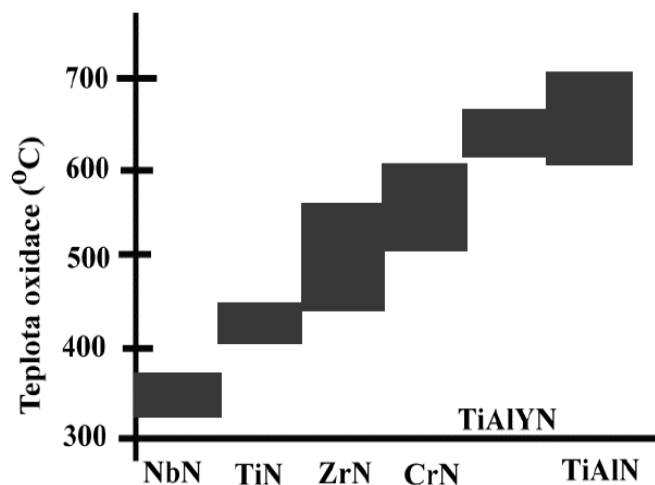


Obr. 29: Schéma fretting testu [27]

4.7. Zkoušení tepelné a chemické odolnosti

K opotřebení vrstvy dochází nejen mechanickými vlivy, ale rovněž působením zvýšené teploty či chemickými reakcemi. [36]

- **Odolnost proti oxidaci:** Při zvýšených teplotách dochází k oxidaci vrstev (obr. 30). Povrchová oxidace může vést k pasivaci povrchu. Hlubková oxidace naopak často vede k destrukci vrstvy. K měření se obvykle používá tzv. **step stress test**. Jde o gravimetrickou metodu, při které se měří změna hmotnosti celoplošně povlakovaného vzorku během oxidace. Ta probíhá při postupném skokovém zvyšování teploty (běžně o 50°C každých 30 minut). Pro různé vrstvy lze zjistit odlišnou maximální teplotu použitelnosti s ohledem na oxidaci. [15], [36]



Obr. 30: Oxidační teploty některých vrstev [15]

- **Tepelná stabilita:** Za zvýšených teplot může kromě oxidace docházet také ke změnám vnitřní struktury (např. k nárůstu krystalitů, změně krystalického uspořádání, změně vnitřního napětí atd.). Příčinou je termodynamická nestabilita povlaku, která je způsobena podmínkami při jeho depozici. Tyto změny se projevují na mechanických vlastnostech. Změny vnitřní struktury ve velmi malém měřítku se dají sledovat pomocí transmisní elektronové mikroskopie (TEM) či pomocí rentgenové difrakce (XRD). [36]
- **Chemická stabilita:** Určuje se odolnost vrstvy proti chemické reakci s jiným materiálem za zvýšených teplot. Může být zásadní např. u řezných nástrojů. Typickým případem jsou DLC vrstvy, které jsou nestabilní při obrábění ocelí, zatímco jsou velmi stabilní při opracování neželezných materiálů. [36]

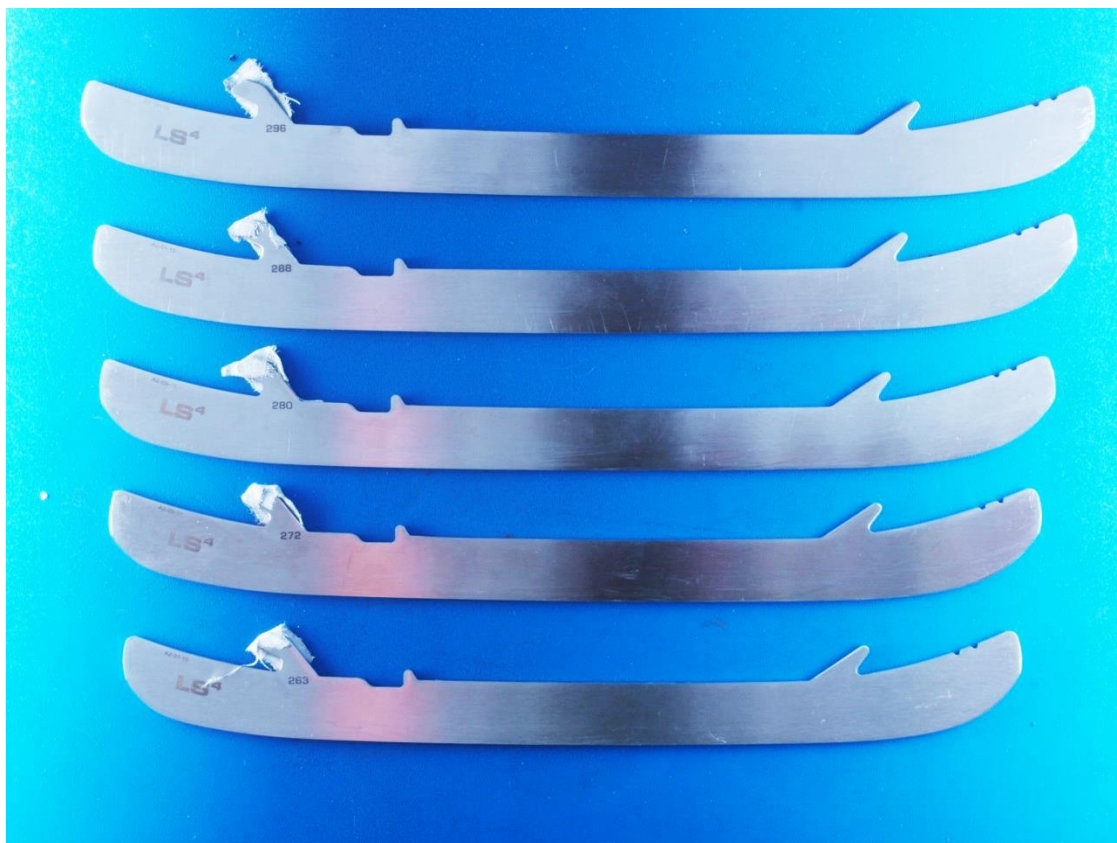
5. Experimentální část práce

5.1. Určení koeficientu smykového tření

Cílem experimentu je určit koeficient smykového tření mezi ledem a bruslařskými noži a posoudit vliv tenké vrstvy WCC na hodnotu tohoto koeficientu.

5.1.1. Použité vzorky

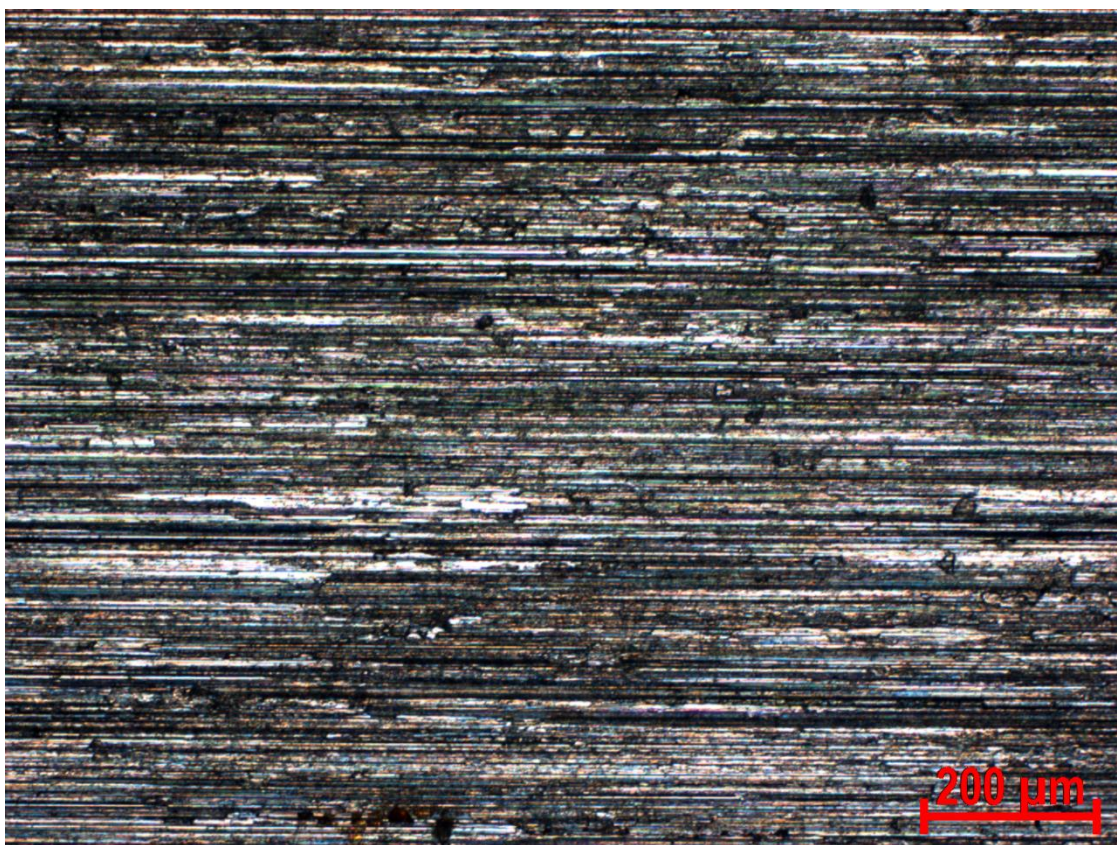
Pro experiment byly použity bruslařské nože TUUK LightSpeed 4 Edge Stainless Steel z martenzitické korozivzdorné oceli s pěti různými rozměry: 263, 272, 280, 288, 296 (viz obr. 31). Jde o běžné velikosti pro dospělé bruslaře. Výrobce dodává rozměry 254 až 306.



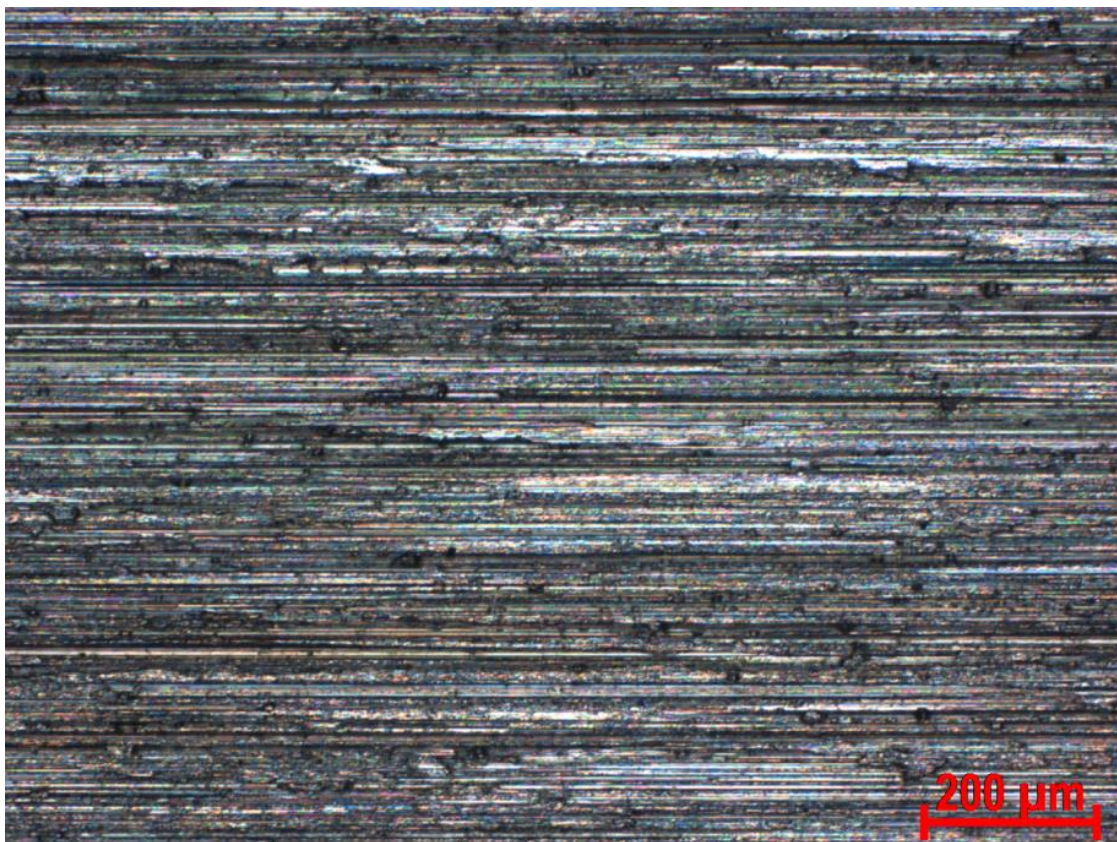
Obr. 31: Vzorky nožů bez povlaku
(Zdroj: archiv autora)

První část měření byla provedena s noži bez povrchové úpravy, které byly před měřením čerstvě nabroušeny.

Druhá část měření byla provedena na nožích s **povlakem WCC**. Tato tenká vrstva byla zvolena s ohledem na vhodné tribologické vlastnosti a na velikost depoziční teploty (vzhledem k použití nožů z martenzitické oceli bylo potřeba depozovat vrstvu při nízké teplotě, a zamezit tak popuštění). Před povlakováním bylo z důvodu zlepšení kvality povrchu provedeno vyleštění kluzné plochy nožů pomocí filcového lešticího kotouče a diamantové lešticí suspenze se zrnitostí 9 μm . Pohled na povrch kluzné plochy nože pomocí optického mikroskopu při 100x zvětšení a zobrazení ve světlém poli před vyleštěním je na obr. 32 a po vyleštění na obr. 33.



Obr. 32: Kluzná plocha nože před vyleštěním, 100x zvětšení
(Zdroj: archiv autora)



Obr. 33: Kluzná plocha nože po vyleštění, 100x zvětšení
(Zdroj: archiv autora)

Použitá tenká vrstva WCC

Povlakování bylo provedeno ve firmě SHM s.r.o. Šumperk na zařízení Placit π411. Tímto děkuji panu Mojmíru Jílkovi z firmy SHM za spolupráci a za následující informace o povlaku WCC. Metodou PVD magnetronového naprašování (viz kap. 3.4.2) v atmosféře $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$ byla nanесena varianta DLC vrstvy s příměsí atomů wolframu – tzv. vrstva WCC (Tungsten Carbon Carbide) s obsahem 15 at. % W / 85 at. % C. Byl použit centrální rotační cylindrický DC magnetron, který zvyšuje rychlost růstu povlaku. Před depozicí bylo provedeno čištění povrchu bombardováním kationty Ar s předpětím 500 V. Při tomto postupu nedochází ke vzniku makročástic na výsledném povrchu. Vlastní depozice probíhala při teplotě do 200°C a předpětí na substrátu 100 V. Tloušťka vrstvy je 3 μm (fotografie z kalotestu je na obr. 34). Tvrdost povlaku odpovídá přibližně 15 GPa a vyznačuje

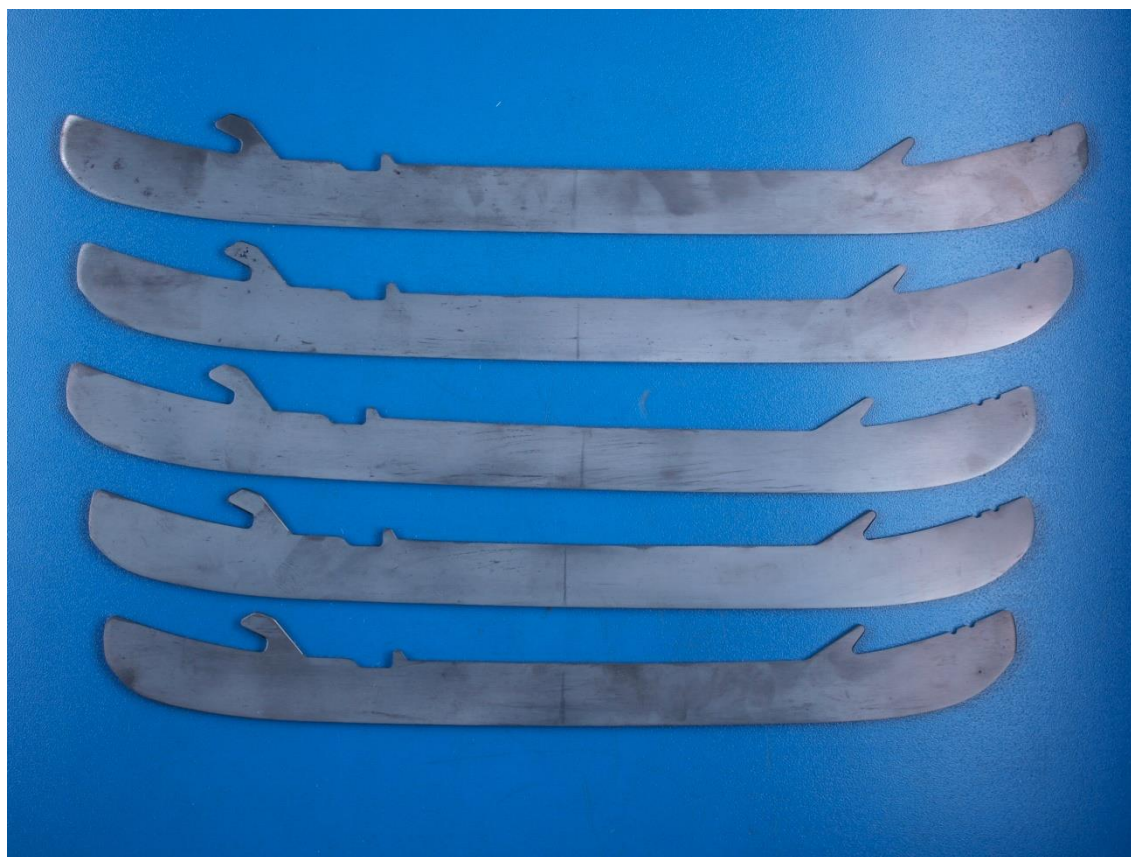
se nízkým koeficientem tření za vlhka. Adheze byla ověřena vnikací zkouškou Mercedes test pomocí Rockwellova indentoru při zatížení 150 kg (viz obr. 35).



Obr. 34: Kalotest naneseného povlaku WCC
(Zdroj: archiv autora - SHM Šumperk)



Obr. 35: Mercedes test naneseného povlaku WCC
(Zdroj: archiv autora - SHM Šumperk)



Obr. 36: Vzorky nožů s povlakem WCC
(Zdroj: archiv autora)

5.1.2. Metodika měření

Koeficient smykového tření mezi bruslemi a ledem jsem vypočítal z poměru naměřené tažné síly a velikosti tíhové síly působící na nože (použité vzorce jsou uvedeny níže). Měření tažné síly jsem prováděl na upravené ledové ploše za pomoci přípravku, závaží a siloměru. Do přípravku jsem upevnil rovnoběžně vždy jeden pár zkoušených nožů, zatížil závažími a poté jsem měřil velikost tažné síly při přímočarém pohybu. Snažil jsem se klást důraz na rovnoměrnost pohybu. Případnou nerovnoměrnost jsem eliminoval měřením průměrné hodnoty síly v čase. Zkoušené nože jsem před měřením ponechal v mrazničce, aby jejich případně zvýšená teplota nezpůsobila zvýšenou míru tání ledu a neovlivnila tak výsledky.



Obr. 37: Přípravek s upevněnými noži a zatížením 40 kg
(Zdroj: archiv autora)

Přípravek jsem zkonstruoval ze dřeva, 2 otočných svěráků pro upevnění nožů a závěsného oka, za které je možné přípravek táhnout. Nože jsem před měřením označil tak, abych je byl schopen do svěráků upnout na střed a do stejné výšky. Rovnoběžnost nožů jsem nastavil pomocí otáčení svěráků a automatického sklonoměru Hedue M521 se stupnicí dělenou po 1° , jak je vidět na obr. 38.



Obr. 38: Nastavení rovnoběžnosti nožů pomocí sklonoměru
(Zdroj: archiv autora)

Pro výpočet koeficientu tření je nutná hodnota tíhového zatížení nožů. Pro měření jsem použil 4 závaží, každé o hmotnosti 20 kg. Měření jsem prováděl pro každou velikost nožů se závažími o celkové hmotnosti 40 kg a 80 kg. Do zatížení je potřeba započítat i tíhu přípravku a samotných nožů (celkem přibližně 7 kg). Velikosti všech uvedených tíhových sil jsem změřil siloměrem. Hodnoty jsou uvedené v tabulce 4.

Tabulka 4: Tíhové síly ovlivňující měření

Závaží č.	1	2	3	4	Přípravek
Tíha [N]	195,9	195,7	195,3	195,6	62,3
Velikost nože	263	272	280	288	296
Tíha páru [N]	5,8	5,8	6,0	6,2	6,4

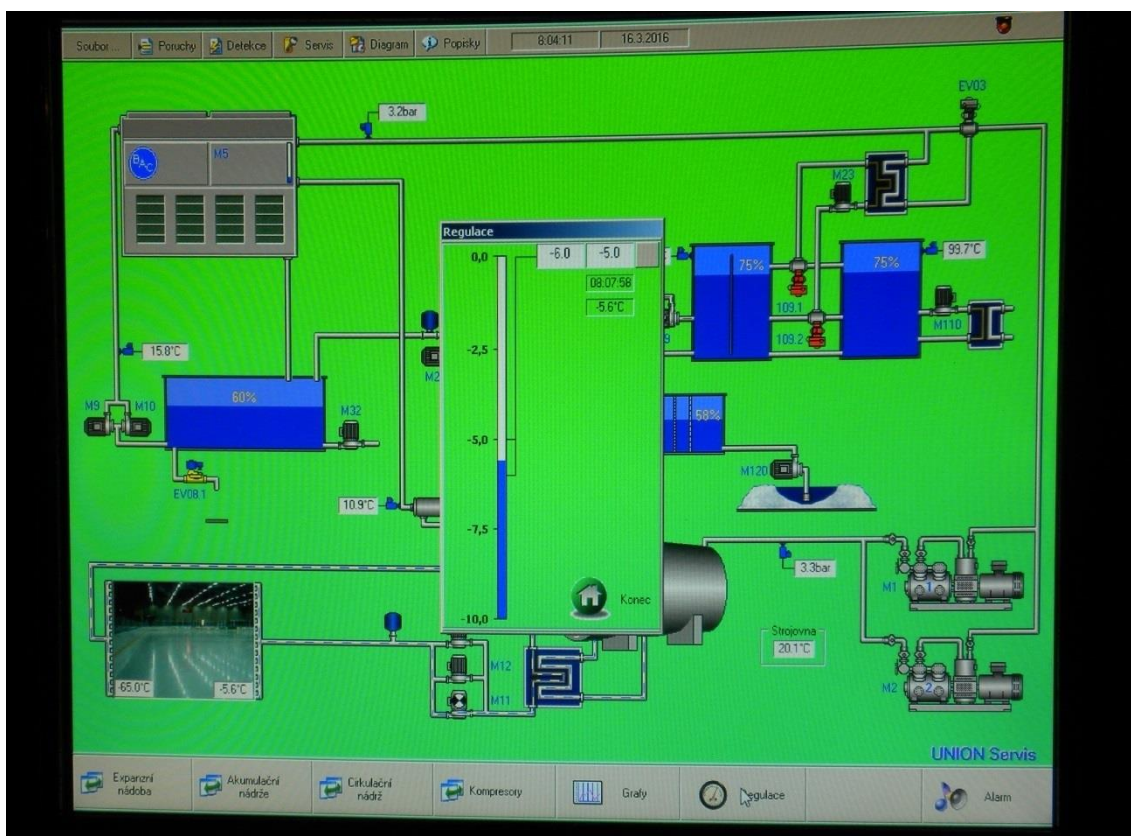
Pro měření síly jsem použil siloměr Mecmesin AFG 500N. Jde o digitální siloměr s rozsahem 500 N, rozlišením 0,1 N a udávanou přesností 0,1% z celkového rozsahu. Způsob měření je vidět na obr. 39. Při měření na ledě jsem z důvodu oscilace tažné síly použil funkci *average/time*, která v reálném čase zobrazuje průměrnou hodnotu síly od okamžiku, kdy měřená síla překročila předem zadanou hodnotu - v mém případě 1% z rozsahu, tedy 5 N. Měření síly jsem prováděl na vzdálenosti 25 m. Doba měření byla průměrně 25 s. Z toho vyplývá, že průměrná rychlost při klouzání po ledě byla 1 m/s.



Obr. 39: Měření tažné síly
(Zdroj: archiv autora)

Měření nebylo z organizačních a časových důvodů možné provést v jeden den. Pro srovnání podmínek jsem zaznamenal teplotu měřenou čidlem umístěným

v ledu (viz obr. 40). Ledová plocha byla vždy po úpravě a dostatečně dlouho ponechána k zamrznutí.



Obr. 40: Ovládací panel na zimním stadionu v Jablonci nad Nisou
(Zdroj: archiv autora)

Použité vzorce

Průměrná tažná síla: \bar{F} [N]

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \text{ [N]} \quad (1)$$

kde: n [–] počet opakování měření,
 F_i [N] naměřená tažná síla.

Průměrná hodnota součinitele smykového tření: \bar{f} [-]

$$\bar{f} = \frac{\bar{F}}{\sum G} \quad [-] \quad (2)$$

kde: $\sum G$ [N] celková tíhová síla zátěže.

Přesnost měřidla: $\pm z_{max}$ [N] - definována výrobcem jako 0,1% z rozsahu 500N

$$z_{max} = \frac{0,1}{100} \cdot 500 = 0,5 \text{ N} . \quad (3)$$

Standardní nejistota měření tažné síly typu A: u_A [N]

$$u_A = k_s \cdot \bar{s} = k_s \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad [N] \quad (4)$$

kde: $k_s = 1,7$ koeficient pro $n = 4$ měření,
 \bar{s} [N] výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru.

Standardní nejistota měření tažné síly typu B: u_B [N]

$$u_B = \frac{z_{max}}{\chi} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,289 \text{ N} \quad (5)$$

kde: $\chi = \sqrt{3}$ parametr pro rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

Kombinovaná standardní nejistota měření tažné síly: u_C [N]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [N] . \quad (6)$$

Rozšířená standardní nejistota koeficientu smykového tření: $U [-]$

$$U = \frac{k_U \cdot u_c}{\sum G} [-] \quad (7)$$

kde: $k_U = 2 [-]$ koeficient rozšíření pro konfidenční interval 95% a normální rozdělení pravděpodobnosti.

5.1.3. Výsledky měření

Měření tažné síly jsem zopakoval celkem třikrát – nože bez povlaku v hale v Jablonci nad Nisou, nože s povlakem v hale v Jablonci nad Nisou a nakonec nože s povlakem v aréně v Praze.

a) Měření nožů bez povlaku v Jablonci nad Nisou

Měření bylo provedeno podle výše uvedené metodiky na Městském zimním stadionu v Jablonci nad Nisou ve dnech 16. a 17. 3. 2016. Teplota ledu byla $-5,6^{\circ}\text{C}$, resp. $-6,1^{\circ}\text{C}$. Venkovní teplota se pohybovala okolo 6°C . Výsledky měření včetně vypočítaných hodnot součinitele smykového tření a nejistoty měření pro nože bez povlaku jsou uvedeny v příloze 1 (tab. 8).

b) Měření nožů s povlakem v Jablonci nad Nisou

Měření bylo provedeno podle výše uvedené metodiky na Městském zimním stadionu v Jablonci nad Nisou dne 6. 4. 2016. Teplota ledu byla $-5,0^{\circ}\text{C}$. Venkovní teplota byla oproti prvnímu měření výrazně vyšší, přibližně 15°C . Výsledky měření včetně vypočítaných hodnot součinitele smykového tření a nejistoty měření pro nože s povlakem měřené v Jablonci jsou uvedeny v příloze 2 (tab. 9).

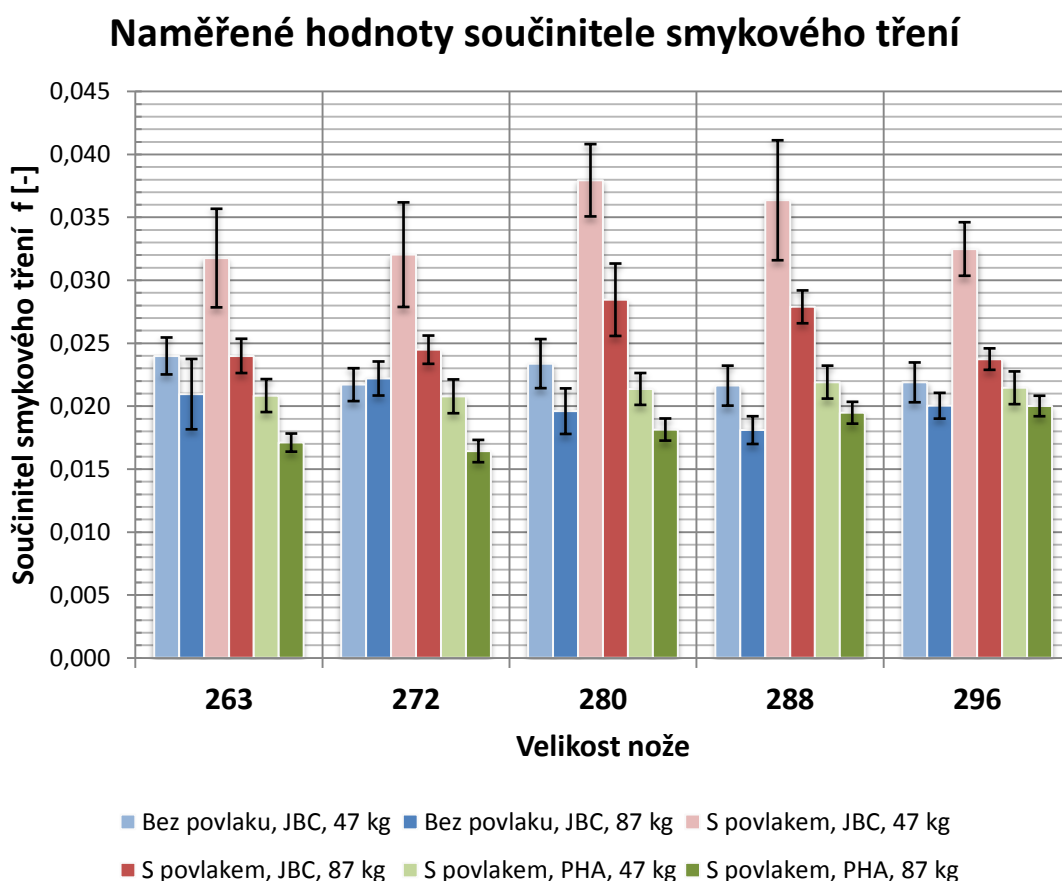
Výsledek byl zkreslený zhoršenou kvalitou ledu, zřejmě kvůli vysoké venkovní teplotě a špatné tepelné izolaci jabloneckého zimního stadionu. Subjektivně led hodnotím jako lepkavý a znatelně méně kluzký, než při prvním měření. Naměřené hodnoty tažné síly byly výrazně vyšší. Proto padlo rozhodnutí, že povlakované nože vyzkouším ještě jednou v jiné hale.

c) Měření nožů bez povlaku v Praze

Měření bylo provedeno podle výše uvedené metodiky v Tipsport areně v pražských Holešovicích dne 20. 4. 2016. Teplota ledu byla $-9,5^{\circ}\text{C}$. Venkovní teplota byla 12°C , vzhledem k lepší izolaci haly to však nemělo velký význam. Výsledky měření včetně vypočítaných hodnot součinitele smykového tření a nejistoty měření pro nože s povlakem měřené v Praze jsou uvedeny v příloze 3 (tab. 10).

Shrnutí naměřených výsledků

Následující graf 1 zobrazuje hodnoty součinitele smykového tření vypočítané z naměřených hodnot tažné síly. Pro každý rozměr nože je zobrazeno 6 sloupců, tj. 3 měření zopakována vždy s celkovým zatížením 47 a 87 kg.



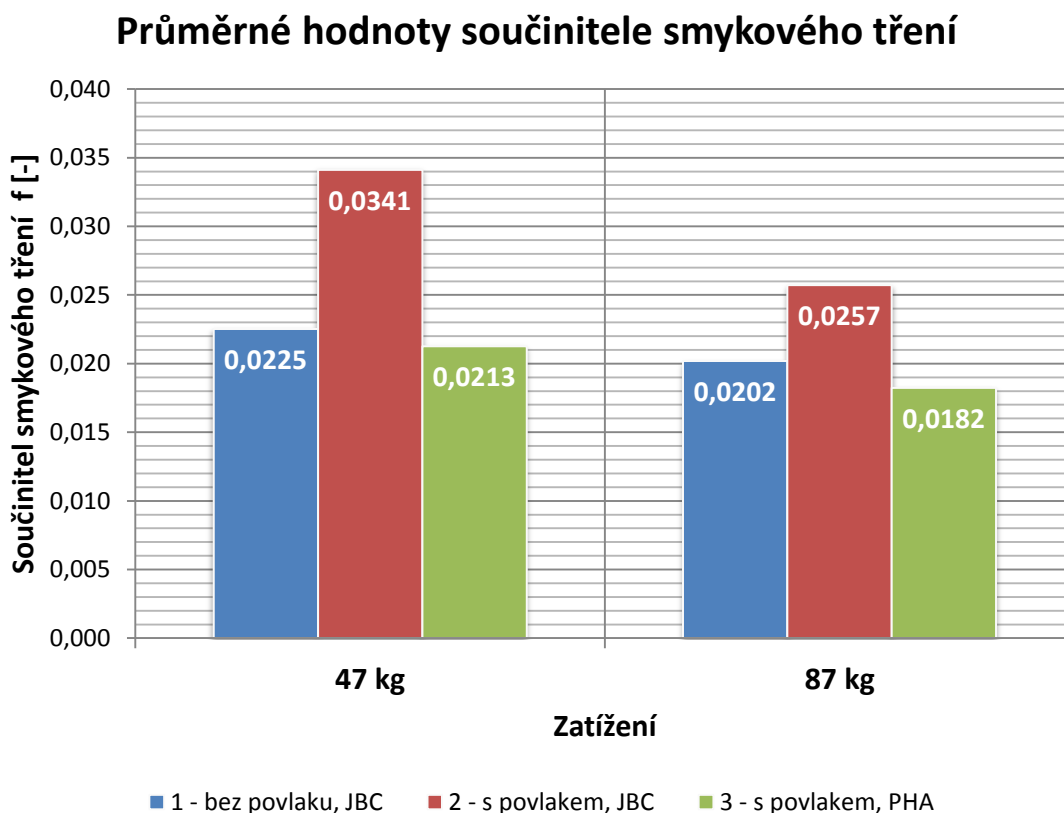
Graf 1: Hodnoty naměřeného součinitele smykového tření

V tabulce 5 jsou uvedeny minimální a maximální hodnoty a vypočítány průměrné hodnoty součinitele tření ze všech měřených délek nožů.

Tabulka 5: Průměrné, minimální a maximální naměřené hodnoty součinitele smykového tření

Zatížení	47 kg			87 kg		
	průměr	min.	max.	průměr	min.	max.
1 - bez povlaku, JBC	0,0225	0,0216	0,0240	0,0202	0,0181	0,0222
2 - s povlakem, JBC	0,0341	0,0318	0,0379	0,0257	0,0237	0,0284
3 - s povlakem, PHA	0,0213	0,0208	0,0219	0,0182	0,0164	0,0200

Srovnání průměrných hodnot koeficientu smykového tření vypočítaných z naměřených hodnot nožů všech délek je v grafu 2.



Graf 2: Srovnání průměrných hodnot naměřeného součinitele smykového tření

5.2. Diskuse výsledků

Pro vyhodnocení výsledků použiji hodnoty z experimentů č. 1 a 3, které považuji za porovnatelné. Výsledky měření č. 2 vynechávám, protože bylo provedeno za zhoršených podmínek, které výrazně nepříznivě ovlivnily výsledky měření (viz kap. 5.1.3 odst. b).

Následující tabulka 6 zobrazuje procentuální změnu hodnoty koeficientu smykového tření po nanesení povlaku WCC. Jde o srovnání výsledků z tabulek 8 a 10 (rovněž zobrazeny v grafu 1). Většina výsledků ukazuje příznivý vliv povlaku na hodnotu koeficientu tření, tedy že došlo k poklesu střední hodnoty o několik procent. Výjimku tvoří výsledek měření nožů o rozměru 288, kde výsledky naznačují nárůst koeficientu. Domnívám se, že na vině je nepřesné nastavení rovnoběžnosti nožů v přípravku při měření tažné síly.

Tabulka 6: Vliv povlaku WCC na střední hodnotu koeficientu smykového tření

Velikost nože	263	272	280	288	296
Změna koeficientu smykového tření po povlakování [%]					
Zatížení 47 kg	-13,2	-4,3	-8,6	1,3	-2,0
Zatížení 87 kg	-18,4	-26,0	-7,5	7,6	-0,1

Srovnáním celkových průměrných hodnot součinitele z tabulky 5 (modrého a zeleného sloupce v grafu 2) získáváme tabulku 7. Z té je patrné, že při zatížení 47 kg došlo díky povlakování k poklesu koeficientu o 5,6% a při zatížení 87 kg dokonce o 9,6%.

Tabulka 7: Vliv povlaku WCC na celkovou průměrnou hodnotu koeficientu smykového tření

	Průměrná hodnota f bez povlaku [-]	Průměrná hodnota f s povlakem [-]	Změna f po povlakování [%]
Zatížení 47 kg	0,0225	0,0213	-5,6
Zatížení 87 kg	0,0202	0,0182	-9,6

Téměř všechny výsledky naznačují, že větší zatížení bruslí (konkrétně 87 kg oproti 47 kg) vede k menšímu koeficientu smykového tření, nižší nejistotě měření a většímu efektu naneseného povlaku. Vyšší měrný (Hertzův) tlak má zřejmě pozitivní vliv na mechanismus tření mezi ledem a bruslí. Při větším zatížení se více uplatní mechanismus tání ledu pod tlakem (viz kap. 2.1), a rovněž může dojít ke snazšímu obroušení případných nerovností (např. makročastic) na kluzném povrchu nože. Kromě toho se při větším zatížení eliminují, či alespoň snižují, účinky některých nepříznivých vlivů, jako jsou nerovnosti na ledové ploše, nerovnoměrnost pohybu při měření apod. Nutno podotknout, že velká část dospělých hokejistů s plnou výzbrojí hravě převyší testované zatížení 87 kg, a tedy že pozitivní vliv povlaku by v praxi mohl být teoreticky ještě vyšší.

Problematika kvality bruslařských nožů má více aspektů, než je pouze míra smykového tření. Pro bruslaře je rovněž důležitá manévrovatelnost či životnost. V zájmu otestování těchto vlastností byla naplánována zkouška povlakovaných bruslí juniorským týmem Sparta Praha. Z časových důvodů ji však nebylo možné provést, a proto byla odložena až na hokejovou sezónu 2016/2017.

Díky zkušenostem získaným při tvorbě této práce, zpětně vidím několik nedostatků. Některým jsem mohl předejít větší pečlivostí a některé byly z organizačních či časových důvodů nevyhnutelné. Zejména jde o podmínky při testování. V zájmu co největší porovnatelnosti výsledků by bylo ideální provést měření s povlakem a bez povlaku v jeden den za identických podmínek (to nebylo možné z organizačních důvodů). Použitý siloměr měl pro tuto aplikaci velký rozsah, a zanesl tedy do měření větší chybu (v rámci možností šlo o nejlepší použitelné zařízení). V případě, že se bude s podobnými experimenty pokračovat, doporučil bych zaměřit se na úpravu metodiky měření s cílem zvýšit přesnost upnutí nožů v přípravku (např. zkonstruovat robustnější přípravek z kovu a nastavovat rovnoběžnost nožů přesnějším sklonoměrem) a eliminovat nerovnoměrnost pohybu. Elektronický záznam měření by umožnil přesnější analýzu měření.

6. Závěr

V rámci diplomové práce jsem krátce nastínil problematiku tření mezi ledem a ledními bruslemi. Dále jsem stručně popsal metody depozice tenkých vrstev z plynné fáze a možnosti jejich testování.

Ve spolupráci s firmou SHM Šumperk jsem navrhnul vhodnou vrstvu (WCC) pro povlakování bruslařských nožů z martenzitické korozivzdorné oceli. S těmito noži jsem provedl experimenty za účelem zjištění koeficientu smykového tření. Výsledky měření a výpočtů jsem shrnul ve formě tabulek a grafů a vyhodnotil v diskusi výsledků.

Výsledkem práce je konstatování, že tenká vrstva WCC se pozitivně projevuje poklesem součinitele smykového tření mezi bruslemi a ledem řádově o jednotky procent. Při větším testovaném zatížení byl patrný větší vliv na pokles koeficientu tření, a to přibližně o 10%.

Citovaná literatura

- [1] Wikijunior: How Things Work/Ice Skates. In: *Wikibooks, The Free Textbook Project* [Online]. 10. 1. 2015 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: http://en.wikibooks.org/wiki/Wikijunior:How_Things_Work/Ice_Skates
- [2] Ice skate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [Online]. 16. 1. 2015 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Ice_skate
- [3] Ice Skates. In: *About.com* [Online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://inventors.about.com/library/inventors/bliceskates.htm>
- [4] KŘÍŽ, A. *Tenké vrstvy*. [Online]. ZČU, [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
- [5] Ice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [Online]. 11. 2. 2015 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ice>
- [6] Led. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [Online]. 15. 2. 2014 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Led>
- [7] Coefficient of friction, Rolling resistance and Aerodynamics. *Tribology-abc* [Online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.tribology-abc.com/abc/cof.htm>
- [8] ROSENBERG, R. *Why is ice slippery?* [Online]. 12. 2005 [cit. 2015-02-11]. American Institute of Physics Dostupné z: <http://lptms.u-psud.fr/membres/trizac/Ens/L3FIP/Ice.pdf>
- [9] Explaining Ice: The Answers Are Slippery. *The New York Times* [Online]. 21. 2. 2006 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.nytimes.com/2006/02/21/science/21ice.htm>
- [10] DU PLESSIS, A. *Low Temperature Plasma Surface Modification of Stainless Steels for Ice Sliding Applications* [Online]. [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: http://etheses.bham.ac.uk/3456/1/DuPlessis_12_MRes.pdf
- [11] Skate runners. *BlackEdge* [Online]. [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://blackedge.runner.com/en/>

- [12] Black steel. *Step skates* [Online]. [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://stepskates.com/blades/black-steel/>
- [13] Cag one profiler skate machine. *Cag One* [Online]. [cit. 13 02 2015]. Dostupné z: <http://cagone.com/profiler/>
- [14] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [15] DAĐOUREK, K. *Vybrané technologie povrchových úprav*. Skripta TUL. Liberec: TUL, 2007. ISBN 978-80-7372-168-8.
- [16] M. SOSNOVÁ, *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování*. [Online]. ZČU, 2006, [cit. 26 02. 2015]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf
- [17] Povlakování. *Böhler Uddeholm* [Online]. [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.bohler-uddeholm.cz/povlakovani.php>
- [18] HOŘEJŠ, M. Povlakování nástrojů metodou PACVD. In: *MM průmyslové spektrum* [Online]. 23. 4. 2008 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd.html>
- [19] PÍŠKA, M. Trendy v PVD a CVD povlakování. In: *MM průmyslové spektrum* [Online]. 13. 11. 2014 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-pvd-a-cvd-povlakovani.html>
- [20] MUSIL, J. a J. VYSKOČIL. *Tenké vrstvy nitridu titanu*. Praha: ČSAV, 1989.
- [21] SEDLÁČEK, V. *Povrchy a povlaky kovů*, Praha: ČVUT, 1992.
- [22] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008.
- [23] SCHMIDTOVÁ, T. Magnetronové naprašování. In: *ChemPoint* [Online] 15. 2. 2012 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/magnetronove-naprasovani>

- [24] LOUDA, M. Použití DLC povlaků (nejen) v automobilovém průmyslu. In: *MM průmyslové spektrum* [Online]. 4. 6. 2013 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu.html>
- [25] DONNET, C a A. ERDEMIR. *Tribology of Diamond-Like Carbon Films*. [Online]. Springer, 2008 [cit. 2015-02-15]. ISBN 978-0-387-30264-5. Dostupné z: http://nashaucheba.ru/docs/22/21843/conv_1/file1.pdf
- [26] a-C:H - Od polymerů po tvrdé otěruvzdorné vrstvy. In: *MM průmyslové spektrum* [Online]. 23. 4. 2003 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/a-c-h-od-polymeru-po-tvrde-oteruvzdorne-vrstvy.html>
- [27] KŘÍŽ, A. *Hodnocení vlastností systémů tenká vrstva-substrát*. [Online]. ZČU, [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Zkousky_vrstev_2010_11.pdf
- [28] VODIČKOVÁ, V. *Metody strukturní analýzy*. [Online]. TUL, 2012 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://epun.kmt.tul.cz/www-temp/MSS_zdroje_mgr/přednášky_pdf/MSS%20I_metody.pdf
- [29] VODIČKOVÁ, V. *Světelná mikroskopie (LOM)*. [Online]. TUL, 2012 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://epun.kmt.tul.cz/www-temp/MSS_zdroje_mgr/přednášky_pdf/MSS%20II_Světelná%20mikroskopie.pdf
- [30] Microscopy. *Zeiss* [Online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/home.html
- [31] VODIČKOVÁ, V. *Elektronová mikroskopie*. [Online]. TUL, 2012 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://epun.kmt.tul.cz/www-temp/MSS_zdroje_mgr/přednášky_pdf/MSS%20elmi.pdf
- [32] VODIČKOVÁ, V. *Elektronová mikroanalýza*. [Online]. TUL, 2012 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://epun.kmt.tul.cz/www-temp/MSS_zdroje_mgr/přednášky_pdf/MSS_VIII_Elektronová%20mikroanalýza.pdf

- [33] ČECH, R. *Studování povrchu mechanickým profilometrem*. [Online]. Brno, 2010 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/269329/prif_b/bp.pdf.
Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- [34] VODIČKOVÁ, V. *Základy spektroskopických metod*. [Online]. TUL, 2012 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: http://epun.kmt.tul.cz/www-temp/MSS_zdroje_mgr/přednášky_pdf/MSS_VI_Základy%20spektroskopický%20metod.pdf
- [35] VODIČKOVÁ, V. *Metody analýzy povrchu*. [Online]. TUL, 2012 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: http://epun.kmt.tul.cz/www-temp/MSS_zdroje_mgr/přednášky_pdf/MSS_IX_Metody%20analýzy%20povrchu.pdf
- [36] ŠÍMA M. a O. ZINDULKA. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. [Online]. 6. 2004 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.kom.tul.cz/to/sdilene/merenipovlaku.pdf>
- [37] VODIČKOVÁ, V. *Zkoušení mechanických vlastností - zkoušky tvrdosti*. [Online]. TUL, 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/3448/mod_resource/content/1/MN1_Mechanické%20vlastnosti-tvrdost.pdf

Tabulka 8: Výsledky 1. měření - nožů **bez povlaku** v Jablonci nad Nisou

Velikost nože	263		272		280		288		296	
Zatížení $\sum G$ [N]	459,7	850,6	459,7	850,6	459,9	850,8	460,1	851,0	460,3	851,2
Teplota ledu [°C]	-5,6				-6,1					
Číslo měření i	Naměřená tažná síla F_i [N]									
1	11,2	16,2	9,9	18,2	11,3	16,5	10,3	15,2	10,3	17,5
2	11,2	18,5	10,0	19,6	10,4	17,9	10,0	14,9	9,7	17,2
3	10,9	19,3	9,9	18,7	10,8	16,0	9,7	15,9	10,1	16,6
4	10,8	17,3	10,1	19,0	10,5	16,3	9,8	15,6	10,2	16,9
Průměrná tažná síla \bar{F} [N]	11,0	17,8	10,0	18,9	10,8	16,7	10,0	15,4	10,1	17,1
Nejistota A tažné síly u_A [N]	0,18	1,16	0,08	0,50	0,34	0,72	0,22	0,37	0,22	0,33
Komb. nejistota tažné síly u_C [N]	0,34	1,19	0,30	0,58	0,45	0,77	0,37	0,47	0,37	0,44
Součinitel smykového tření f [-]	0,0240	0,0210	0,0217	0,0222	0,0234	0,0196	0,0216	0,0181	0,0219	0,0200
Rozšířená nejistota součinitele smykového tření U (95%) [-]	0,0015	0,0028	0,0013	0,0014	0,0020	0,0018	0,0016	0,0011	0,0016	0,0010

Tabulka 9: Výsledky 2. měření - nožů s povlakem v Jablonci nad Nisou

Velikost nože	263		272		280		288		296	
Zatížení $\sum G$ [N]	459,7	850,6	459,7	850,6	459,9	850,8	460,1	851,0	460,3	851,2
Teplota ledu [°C]	-5,0									
Číslo měření i	Naměřená tažná síla F_i [N]									
1	15,7	21,0	16,3	20,8	18,2	25,3	18,0	24,3	15,4	20,3
2	15,2	20,8	14,5	20,8	17,8	25,0	17,5	24,1	14,3	20,5
3	13,7	20,0	14,1	20,3	16,6	24,3	16,1	23,3	15,1	20,1
4	13,8	19,8	14,0	21,4	17,2	22,2	15,3	23,2	15,0	19,9
Průměrná tažná síla \bar{F} [N]	14,6	20,4	14,7	20,8	17,5	24,2	16,7	23,7	15,0	20,2
Nejistota A tažné síly u_A [N]	0,85	0,50	0,91	0,38	0,60	1,19	1,06	0,47	0,40	0,22
Komb. nejistota tažné síly u_C [N]	0,90	0,58	0,96	0,48	0,66	1,22	1,10	0,55	0,49	0,36
Součinitel smykového tření f [-]	0,0318	0,0240	0,0320	0,0245	0,0379	0,0284	0,0364	0,0279	0,0325	0,0237
Rozšířená nejistota součinitele smykového tření U (95%) [-]	0,0039	0,0014	0,0042	0,0011	0,0029	0,0029	0,0048	0,0013	0,0021	0,0009

Tabulka 10: Výsledky 3. měření - nožů s povlakem v Praze

Velikost nože	263		272		280		288		296	
Zatížení $\sum G$ [N]	459,7	850,6	459,7	850,6	459,9	850,8	460,1	851,0	460,3	851,2
Teplota ledu [°C]	-9,5									
Číslo měření i	Naměřená tažná síla F_i [N]									
1	9,7	14,7	9,7	14,2	9,8	15,7	10,2	16,9	10,0	16,9
2	9,5	14,4	9,6	13,9	9,8	15,6	10,0	16,4	9,8	17,1
3	9,5	14,6	9,4	14,2	9,9	15,1	10,0	16,7	9,9	16,8
4	9,6	14,5	9,5	13,6	9,8	15,3	10,1	16,3	9,8	17,3
Průměrná tažná síla \bar{F} [N]	9,6	14,6	9,6	14,0	9,8	15,4	10,1	16,6	9,9	17,0
Nejistota A tažné síly u_A [N]	0,08	0,11	0,11	0,24	0,04	0,23	0,08	0,23	0,08	0,19
Komb. nejistota tažné síly u_C [N]	0,30	0,31	0,31	0,38	0,29	0,37	0,30	0,37	0,30	0,34
Součinitel smykového tření f [-]	0,0208	0,0171	0,0208	0,0164	0,0214	0,0181	0,0219	0,0195	0,0215	0,0200
Rozšířená nejistota součinitele smykového tření U (95%) [-]	0,0013	0,0007	0,0013	0,0009	0,0013	0,0009	0,0013	0,0009	0,0013	0,0008